

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**LIBEREC 2010**

**Bc. Zoryna Slota**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta textilní**



Studijní program: N 3106 Textilní inženýrství

Studijní obor: Textilní materiálové inženýrství

## **STANOVENÍ TRANSPORTNÍCH VLASTNOSTÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN POMOCÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ**

## **ESTIMATION OF INORGANIC FIBERS PROPERTIES USING NUMERICAL SIMULATIONS**

Bc. Zoryna Slota

KTM - 538

Vedoucí práce: Ing. Blanka Tomková, Ph.D.

Počet stránek textu: 50

Počet obrázků: 32

Počet tabulek: 19

Počet příloh: 3

## **Originál zadání práce**

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 07.01. 2010

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla především poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Blance Tomkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování a vyhodnocení experimentu. Taky jsem ji vděčna za poskytnutí materiálů pro zpracování diplomové práce. Poděkování rozhodně patří i mé rodině, která mi studium umožnila, a která mi byla po celou dobu velkou oporou.

## **Anotace**

Diplomová práce se věnuje stanovení transportních vlastností anorganických vláken pomocí numerické simulace a experimentálních měření. Rešeršní část je zaměřená na charakteristiku jednotlivých druhů anorganických vláken, jejich složení, výrobu a využitelnost v praxi. Součástí je charakteristika tepelné a elektrické vodivosti vláken a metody jejich stanovení. V experimentální části je popsáno vytvoření vícestupňového geometrického modelu kompozitního vzorku a metodika stanovení jeho elektrické vodivosti pomocí simulace v programu COMSOL. Kalibrací modelu pomocí výsledků experimentálních měření byla stanovena elektrická vodivost skleněných vláken. Vlastnosti termoplastické matrice byly experimentálně změřeny a v modelu vystupují jako konstantní.

## **Annotation**

The task of the thesis is the estimation of transport properties of inorganic fibers using combination of numerical simulations and experimental measurements. Bibliographic search summarizes the types of inorganic fibres, their structure, properties, manufacturing and utilization. Further the thermophysical and electrical properties of the fibres, and the methods of their estimation are described. Experimental part solves the design and development of multiscale geometry model of composite structure, and its utilization for calculation of electrical conductivity of the composite using COMSOL software. The calibration of the model using experimental data was realized using set of the fibres properties. The properties of thermoplastic matrix were measured and they are constant in the model.

## **Klíčová slova:**

Anorganická vlákna, termoplastická matrice, kompozitní materiály, transportní vlastnosti, elektrická vodivost, vícestupňový geometrický model, numerické simulace.

## **Key words**

Inorganic fibres, thermoplastic matrix, composites, transport properties, electrical conductivities, multiscale geometry model, numerical simulations.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, ZNAČEK A SYMBOLŮ

b,c.....	konstanty zjištěné měřením
$\alpha$ .....	konstanta
E-sklo/PP .....	kompozit s polypropylenovou maticí a výztuží ze skleněných vláken (E-sklo)
E-sklo.....	E-skleněná vlákna
K.....	keprová vazba
P .....	plátňová vazba
PAN.....	polyakrylonitrylová vlákna
PP.....	polypropylen

## SEZNAM FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

$\omega_{hm}$ .....	vlhkost materiálu podle hmotnosti [%]
$\gamma_0$ .....	vodivost ve slabých místech izolantu
$\delta$ .....	elektrická vodivost materiálů [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]
$\delta_E$ .....	elektrická vodivost [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]
$\epsilon_0$ .....	permitivita vakua [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\epsilon_r$ .....	poměrná permitivita [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\epsilon$ .....	absolutní permitivita [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$\varphi$ .....	elektrický potenciál [V]
$\lambda_0$ .....	tepelná vodivost izolace při teplotě [0°C]
$\lambda_{suh}$ .....	koeficient tepelné vodivosti suchého materiálu [W/mK]
$\tau_v$ .....	vybíjecí časová konstanta
$\Delta\lambda$ .....	zvětšení tepelné vodivosti materiálu [%], při zvětšení vlhkosti materiálu o 1 % podle hmotnosti
b .....	teplotní koeficient. Daný lineární závislostí zvláště pro teploty 25-125°C a 125-300°C.
e .....	elementární elektrický náboj $1,6021765 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
d .....	tloušťka vzorku materiálů [cm]
k .....	Bolzmannova konstanta [ $1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ]
$l_{25k}$ .....	koeficient tepelné vodivosti materiálu při teplotě 25°C

$l_v$ .....	délka vlákna [cm]
$q$ .....	elektrický náboj [C]
$t$ .....	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_{cp}$ .....	průměrná teplota vrstvy materiálu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vec{E}$ .....	intenzita elektrického pole, [ $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ ] [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$E_m$ .....	maximální intenzita elektrického pole po skončení procesu nabíjení [F/m]
$E_p$ .....	potenciální energie [J]
$E_r$ .....	relativní intenzita elektrického pole [F/m]
$\vec{F}$ .....	elektrická síla působící na kladný bodový náboj [N]
$G$ .....	vodivost [siemens, $S = \text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^3\cdot\text{A}^2 = \Omega^{-1}$ ]
$I$ .....	proud [A]
$I/S_v$ .....	plošná hustota proudu [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$J^e$ .....	hustota proudu [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$K$ .....	koeficient tepelné vodivosti [W/mK]
$R$ .....	odpor [ $\Omega$ ]
$Q_j$ .....	zdroj proudu [A]
$U$ .....	elektrické napětí [V]
$U/l_v$ .....	intenzita elektrického pole [F/m]
$V$ .....	napětí [V]
$W$ .....	práce kterou vykoná elektrická síla, [N]
$T$ .....	teplota [K]



# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. REŠERŠNÍ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. ANORGANICKÁ VLÁKNA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. TYPY ANORGANICKÝCH VLÁKEN .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. VÝROBA A SLOŽENÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN.....</b>	<b>13</b>
2.3.1. SKLENĚNÁ VLÁKNA.....	13
2.3.2. ČEDIČOVÁ VLÁKNA .....	14
2.3.3. UHLÍKOVÁ VLÁKNA .....	15
2.3.4. KERAMICKÁ VLÁKNA.....	18
<b>2.4. VLASTNOSTI ANORGANICKÝCH VLÁKEN.....</b>	<b>20</b>
2.4.1. SKLENĚNÁ VLÁKNA.....	20
2.4.2. ČEDIČOVÁ VLÁKNA .....	21
2.4.3. UHLÍKOVÁ VLÁKNA .....	22
2.4.4. KERAMICKÁ VLÁKNA.....	23
<b>2.5. TEPELNÁ ODOLNOST.....</b>	<b>24</b>
2.5.1. TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI.....	26
2.5.2. VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA TEPELNOU VODIVOST.....	27
<b>2.6. ELEKTRICKÁ VODIVOST ANORGANICKÝCH VLÁKEN .....</b>	<b>29</b>
2.6.1. ZPŮSOBY VÝPOČTU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI TEXTILIE A VLÁKEN.....	31
<b>2.7. POUŽITÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN.....</b>	<b>34</b>
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....</b>	<b>37</b>
3.1.1. ELEKTRICKÉ POLE .....	37
3.1.2. POLARIZACE A PERMITIVITA .....	39
3.1.3. VLASTNOSTI IZOLANTU.....	40
<b>3.2. STUDIOVANÝ MATERIÁL - KOMPOZIT E-SKLO/PP .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3. OBRAZOVÁ ANALÝZA .....</b>	<b>43</b>
3.3.1. TYPY OBRAZŮ .....	44
3.3.2. PODSTATA MĚŘENÍ.....	45
<b>3.4. VYTVOŘENÍ NUMERICKÉHO MODELU.....</b>	<b>46</b>
3.4.1. VÝPOČET TEORETICKÉ HODNOTY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KOMPOZITU .....	48
3.4.2. ZJIŠTĚNÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI SKLENĚNÝCH VLÁKEN POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE.....	52
3.4.3. VÝPOČET ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KOMPOZITU E-sklo/PP POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE.....	53
<b>4. DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>58</b>
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>

<b>6. POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>65</b>
<b>PŘÍLOHÁ Č. 1.....</b>	<b>66</b>
<b>PŘÍLOHÁ Č. 2.....</b>	<b>73</b>
<b>PŘÍLOHÁ Č. 3.....</b>	<b>79</b>

# 1. ÚVOD

V současné době nelze nezaznamenat velice rychlý technický pokrok naší společnosti. Součástí pokroku posledních let je vytváření zcela nových materiálů s naprosto unikátními vlastnostmi. V dnešní době jsou na materiál kladeny vysoké nároky. Především jde o zvyšování kvality jeho užitných vlastností, o jeho odolnost, funkčnost a v neposlední řadě spolehlivost. Ideálním materiálem je ten, jehož vlastnosti je možné ovlivňovat v závislosti na jeho použití v praxi. Zvyšující se nároky na materiál a výrobky z něj samozřejmě podněcují i rozvoj nových technologií, pomocí kterých je možné tyto nové materiály vyrábět. Většinou se jedná o materiály tzv. kompozitní, což jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více složek (a nebo fází), které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Jedna složka, obvykle nespojitá, se nazývá výztuž a má výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost apod.) než druhá složka (obvykle spojitá, poddajnější), která se nazývá matrice. Ta plní funkci pojiva výztuže. V moderních kompozitních materiálech je výztuž většinou tvořena speciálními vlákny (uhlík, sklo, kevlar apod.).

Kompozitní materiály s vláknovou výztuží patří k nejdynamičtěji se rozvíjející skupině nových materiálů. Jestliže do pryskyřice či plastu přidáme výztuž ve formě vláken, která mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, získáme zcela novou, unikátní skupinu materiálů kombinující synergické vlastnosti výztuže se snadností zpracování polymerů.

Důležitou součástí přípravy těchto materiálů je predikce vlastností finálních výrobků. V oblasti designu se s úspěchem využívá počítačových simulací, kdy při znalosti vlastností vstupních složek (výztuž, matrice) a geometrie finálního výrobku, můžeme analyzovat reakci výrobku na zvolené zatížení. Tento přístup umožňuje efektivní využití finančních prostředků a zároveň zkracuje čas potřebný k vytvoření technických zařízení vhodných například pro komerční výrobu kompozitních materiálů. Kromě toho počítačové simulace umožňují zvolení optimálních výrobních podmínek, při nichž výrobní proces probíhá s nejlepšími výsledky.

Zajímavou oblastí kde počítačové simulace nacházejí své uplatnění je studium transportních vlastností vláknových kompozitů. Experimentální stanovení těchto vlastností je u vstupních složek (výztuže a matrice) problematické, u jednotlivých vyztužujících vláken prakticky nemožné. Transportní vlastnosti vláken jsou většinou

počítány z hodnot transportních vlastností naměřených na nadvláknenných útvarech (tkaniny, pleteniny, 3D textilie, popř. kompozitní desky) a ze znalosti mikrostruktury těchto útvarů (počet vláken, objemový podíl vláken, průřezy a měrné hmotnosti vláken apod.).

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit vícestupňový geometrický model, který by umožnil stanovení transportních vlastností skleněných vláken pomocí numerických simulací, známe-li transportní vlastnosti finálního výrobku, v tomto případě jednosměrně vyztuženého kompozitu sklo/PP. Vytvořený numerický model byl kalibrován pomocí experimentálních měření (v tomto případě elektrické vodivosti) připravené kompozitní desky. Získané hodnoty elektrické vodivosti skleněných vláken byly porovnány s údaji dostupnými pro daný materiál v literatuře. V závěru byly vyhodnoceny možnosti využití tohoto modelu pro stanovení dalších transportních vlastností anorganických vláken.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST

### 2.1. ANORGANICKÁ VLÁKNA

Anorganická vlákna jsou vláknové materiály vyrobené z některých elementů kovů (B), oxidu křemíku, hliníku nebo zirkonu (Si, Al nebo Zr), karbidu křemíku a boru, nitridu hliníku a jiných prvků a taky jejich směsí.

Většina anorganických vláken má polykrystalickou strukturu, skleněná vlákna – amorfní. Vlákna jsou většinou porézní, obecně platí, čím je poróznost vláken vyšší, tím nižší je jejich hustota a mechanické vlastnosti. Anorganická vlákna jsou většinou odolná vůči agresivním látkám, proti vysokým teplotám, jsou nehořlavá a mají dobré mechanické vlastnosti [1, 8]. Z těchto důvodů jsou využívána v řadě aplikací ať už ve formě vláken (zvukotěsně, žáruvzdorné izolace) nebo jako výztuže kompozitních dílů (lamináty).

### 2.2. TYPY ANORGANICKÝCH VLÁKEN

#### 1. Přírodní

- azbest

#### 2. Umělá

- skleněná
- keramická
- čedičová
- uhlíková
- kovová
- ostatní

Výstižné je rozdělení podle skutečného stavu a struktury vláknových materiálů. Z tohoto hlediska dělíme anorganická vlákna na dva druhy:

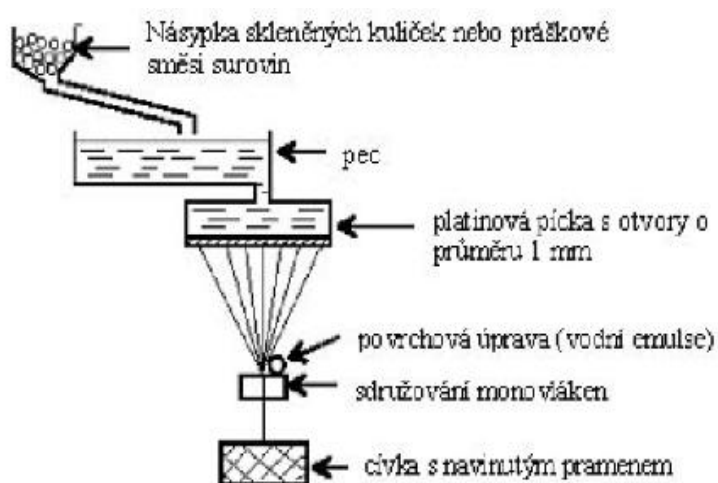
1. vlákna s polykrystalickou strukturou; do této skupiny patří azbest, všechna kovová vlákna, vlákna uhlíková a některá keramická (SiC);
2. vlákna s amorfní strukturou; do této skupiny patří všechna ostatní vlákna, tj. skleněná, čedičová, některá keramická ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ ) apod. [1,5,8]

## 2.3. VÝROBA A SLOŽENÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN

### 2.3.1. SKLENĚNÁ VLÁKNA

Skleněná vlákna jsou vlákna tažená z roztaveného anorganického skla, nejčastější surovinou je tzv. E-sklo. [9,14] Skleněná vlákna jsou vyráběna buď jako monofily o délce až několik km a průměru 3-50  $\mu\text{m}$ , nebo jako staplová skleněná vlákna o délce 1-50 cm a průměru 0,1-20  $\mu\text{m}$ . Všechna skleněná vlákna mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ), liší se podle typu příměsí ve sklářské surovině (oxidy Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem oxidu alkalických kovů Na a K (viz. obr.č.1). Podle typu sklářské směsi jsou vlákna rozdělena do jednotlivých skupin, jejichž materiálové vlastnosti se liší (viz.tab.č.1). [1,5]

Vlákna mohou být dodávána buď ve formě stříže, což jsou nařezaná nebo nasekaná vlákna na určitou délku, nebo jako multifily (jednosměrné svazky několika tisíc nekonečných vláken), viz. obr.č.2. Nejběžnější průměr vláken je od 7 do 15  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 1 Schéma výroby skleněných vláken [9]

Obrázek č. 2 Skleněná vlákna [14]

#### Dělení skleněných vláken

- 1) **E-skla** → tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-boro-křemičité sklo (Eutal), eutektické složení s nejmenší teplotou tavení, sklo pro elektrotechniku
  - jsou levnější a nejpoužívanější

- mají dobré elektroizolační vlastnosti – vysoká pevnost a pružnost, nevodivost, velký povrchový odpor.

2) **S-skla** → vyšší tepelná odolnost

- obsahují vysoký obsah oxidu křemíku a hliníku
- je pevnější než E-sklo
- dobrá odolnost v prostředí kyselin
- je dražší (větší teplota tavení)
- jeho použití je většinou omezeno jen na aplikace v leteckém průmyslu.

3) **AR-skla** → se používají např. ve stavebnictví, protože má vysokou odolnost vůči hydroxidům a UV záření

- je odolná vůči zásaditému prostředí (výroba střešních šablon s cementovým pojivem, tzv. „ekologický eternit“)

### 2.3.2. ČEDIČOVÁ VLÁKNA

Technologie výroby čedičových vláken je podobná výrobě skleněných vláken. Čedič se zvlákňuje ve zvlákňovací peci při teplotách kolem 1300 °C. Pro výrobu kontinuálních vláken nesmí teplota tavení přesáhnout limit 1250°C. Technologie výroby čedičových vláken se skládá z centrifugálního vyfukování, multirolování a vyfukování při tuhnutí (obr.č.4).

Získané vlákno se pak označuje zkratkou BSF (Basalt superthin fibre). Čedičová vlákna jsou ve formě nekonečných vláken, průměr těchto vláken je 9-13 μm, tento průměr se dále neztenčuje ani při jejich zpracování a vlákna se podélně neštěpí (obr.č.3). [1,9]



Obrázek č. 3 Čedičová vlákna [9]



Obrázek č. 4 Stroje pro výrobu čedičových vláken z pece malých rozměrů ovládaná automatickými podáváči čedičových kuliček [9]

Surovinou pro výrobu čedičových vláken jsou čedičové vulkanické horniny. Čedičová vlákna mají podobné složení jako vlákna skleněná, obsahují však daleko vyšší množství oxidu železa (viz. tab.č.1). Rozsah teplot použití čedičových vláken leží v intervalu od  $-260^{\circ}\text{C}$  do  $700-900^{\circ}\text{C}$ , zatímco pro skleněná vlákna od  $-60^{\circ}\text{C}$  do  $+450^{\circ}\text{C}$ . Navlhavost čedičových vláken je 1% a u skleněných až 10-20%. Čedičová vlákna mají výborné tepelné, mechanické i akustické vlastnosti, vysokou odolnost vůči alkáliím a nižší odolnost vůči kyselinám. [9]

Tabulka č. 1. Složení skleněných a čedičových vláken [9]

Vlákno	Složení hmoty [%]									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	FeO
Skleněné										
C	72	0,6	-	10	2,5	-	14,2	-	-	-
S	74,5	0,3	-	0,5	-	22	1	1,5	-	-
E	54	14	0,2	17,5	4,5	8	-	0,5	-	-
AR	70,5	3,1	0,2	8,7	3,1	-	12	-	-	-
Čedičové	52	17,73	2,82	8,75	5,30	-	3,78	1,08	1,54	6,37

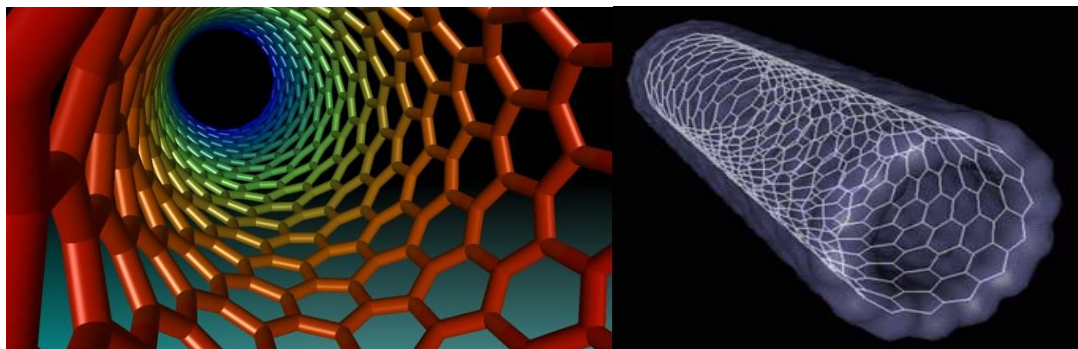
Čedičová vlákna se používají zejména jako oděruvzdorné izolační materiály (tepelné a zvukové izolace, náhrada azbestu). V některých kompozitních aplikacích pak začínají nahrazovat skleněná vlákna. [9]

### 2.3.3. UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Tato vlákna se nejčastěji připravují pyrolýzou polymerních prekurzorů v inertní atmosféře (dusík, argon) při teplotách od  $1000$  do  $3000^{\circ}\text{C}$ . Podle obsahu uhlíku ve struktuře uhlíkových vláken rozlišujeme vlákna karbonizovaná (maximálně 90 %



uhlíku), uhlíková (od 91 do 99 %) a grafitová (nad 99 % uhlíku). Mezi nejmodernější uhlíkové materiály patří uhlíkové nanotrubičky (nanovlákná, obr.č.5). [1,11]



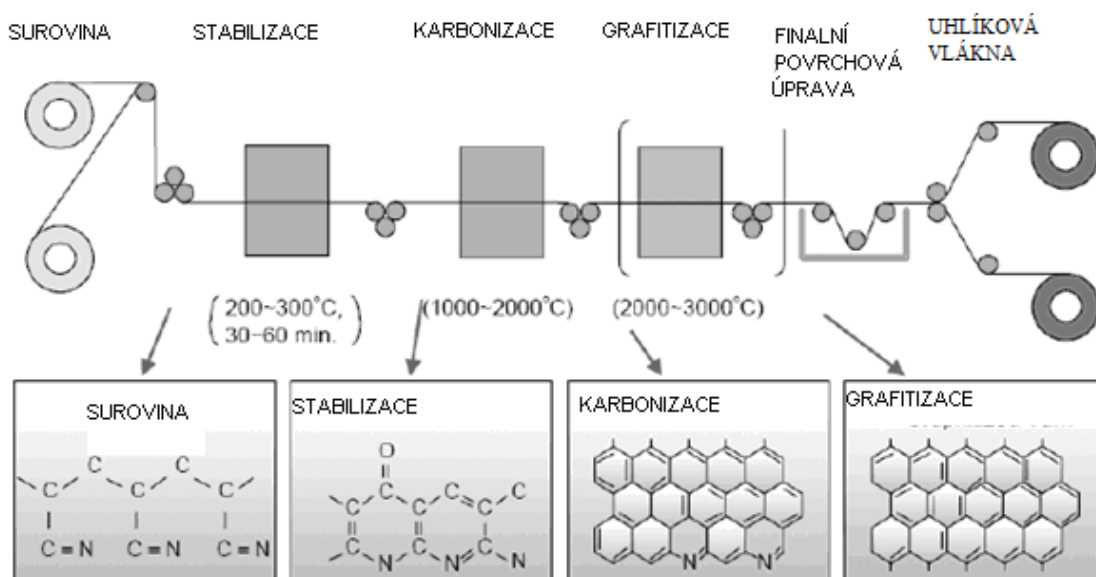
Obrázek č. 5 Uhlíkové nanotrubičky [11]

Pro výrobu uhlíkových vláken se nejčastěji používají dva typy polymerních prekurzorů: polyakrylonitrilová vlákna (PAN) a mezofázové smoly. Nejvíce používaná jsou uhlíková vlákna na bázi PAN s vysokou pevností (2,5-4 GPa) a středním modulem pružnosti (300-400 GPa) ve směru osy vlákna.

#### A) Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN:

- **Stabilizace** - při teplotách 220 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno při této etapě zčerná a stane se netavitelným.
- **Karbonizace** - při teplotách od 1000 do 1500 °C v inertním prostředí (velmi čistý dusík) ve vláknu proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.
- **Grafitizace** - při teplotách od 1800 do 3000 °C v inertním prostředí (velmi čistý argon). Dále se zvýší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokystalů. Vyvinutější mikrokristaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna. U standardních vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. U nejtužších vláken je používáno dloužení při grafitizaci. Při dloužení se zmenší úhel odklonu mikrokystalu od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna z PAN). [13]

Schematický postup výroby uhlíkového vlákna a příslušné změny struktury jsou znázorněny na obrázku č.6.



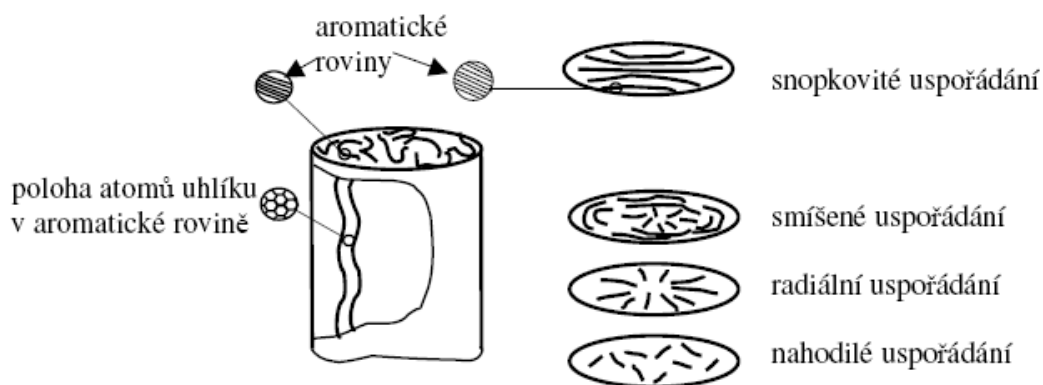
Obrázek č.6 Postup výroby uhlíkového vlákna a příslušné změny struktury [13]

## B) Postup výroby uhlíkového vlákna ze smol:

Pokud není při tepelném zpracování překročena teplota  $1000^\circ\text{C}$ , mají vzniklá uhlíková vlákna menší modul pružnosti a malou pevnost. Vysoce tuhá a přitom pevná vlákna poskytují pouze tzv. mezofázové smoly (zbytku po destilaci černého uhlí a ropy). V mezofázových smolách jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti paralelně uspořádány, tj. i v tekuté smole jsou krystaly (kapalné krystaly).

Při zvláknění smoly ve viskózním stavu (po zahřátí na potřebnou teplotu) se aromatické roviny orientují podél osy vlákna. Po stabilizaci vlákna oxidací následuje předkarbonizace, karbonizace a nakonec grafitizace. Špičkové typy vláken (moduly pružnosti v tahu se pohybují kolem  $800\text{ GPa}$ ) se při grafitizaci ještě dluží.

Vlákna ze smol mají jinou mikrotexturu než vlákna z PAN. Aromatické roviny vytvářejí rozměrnější deskovité krystaly turbostratického uhlíku. Krystaly jsou téměř paralelní s osou vlákna (aromatické roviny nejsou zvlněny). Jejich převládající uspořádání v příčném řezu je možno charakterizovat jako radiální, nahodilé, smíšené nebo snopkovité (viz. obr.č.7). Ve vláknech ze smol jsou vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku též mikroskopické póry ve tvaru polyedru, menší turbostratické mikrokrystaly a polykrystalický grafit. [13]



Obrázek č.7 Mikrostruktura uhlíkových vláken [13]

U vysoce tuhých grafitizovaných vláken z mezofázových smol, která mají kruhový průřez, může již během ochlazování z teplot grafitizace vznikat tak velké vnitřní pnutí, že dojde k podélnému popraskání vláken. Zdokonalením výroby mezofázových smol z rafinovaných uhelných a ropných smol se podařilo podobné jevy eliminovat a pevnost nejnovějších vysokomodulových vláken ze smol je srovnatelná s pevností standardních uhlíkových vláken z PAN.

Lze poznamenat, že uhlíková vlákna jsou dražší než skleněná a jejich použití se určuje vztahem cena/vlastnosti. Tato vlákna se používají v leteckém a automobilovém průmyslu, pro armádní účely (tanky, rakety, letadla atd.) a pro výrobu špičkového sportovního zboží. [13, 17]

#### 2.3.4. KERAMICKÁ VLÁKNA

Tento tepelně odolný a ohnivzdorný materiál je nejčastěji vyrobený z oxidů kovů pro použití při teplotách vyšších než 1150°C. Vlákna obsahují:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (35-51 % hmotnostních),  $\text{SiO}_2$  (47-54%),  $\text{CaO}$  (<1 %),  $\text{MgO}$  (<1 %),  $\text{Na}_2\text{O}_3$  (<1%),  $\text{ZrO}_2$  (0-17 %). Keramická vlákna pro speciální účely mohou obsahovat thorium, magnesium, berylium, titan atd. Daná keramická směs se taví v elektrické peci za teploty vyšší než 2000°C. Pak se proud taveniny odtahuje, následně se vytvářejí vlákna vyfukováním nebo prouděním. [10]

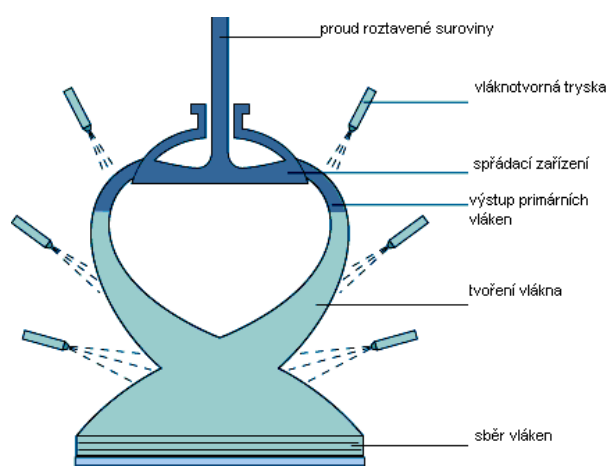
Tabulka č. 2. Složení keramických vláken [10]



Obrázek č. 8 Surovina pro keramická vlákna [10]

Teplota	1250 <sup>0</sup> C	1350 <sup>0</sup> C	1400 <sup>0</sup> C
SiO <sub>2</sub>	50-58 %	46-50 %	52-56 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42-50 %	50-54 %	28-32 %
ZrO <sub>2</sub>			14-18 %
louhy	< 0.25 %	< 0.25 %	< 0.25 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Ti <sub>2</sub> O	< 0.20 %	< 0.20 %	< 0.20 %

Při výrobě keramických vláken se používá dutý válec, který slouží jako spřádací mechanismus, nebo odstředivka se svislou osou otáčení (viz. obr. č.9). Na obvodu svislých stěn odstředivky je několik tisíc rovnoměrně uspořádaných otvorů. Roztavená surovina s určitou rychlostí dochází do centrální části odstředivky. Za vlivu odstředivé síly se kapky suroviny odrazí na povrch odstředivky a jsou rozprášena přes otvory ve formě tenkých vláken. Další protahování prvotních vláken se provádí s pomocí speciálních kapalin, nastříkáváných z trysek. V důsledku je vytvořeno vlákno se středním průměrem od 6 do 7  $\mu\text{m}$ . Kapalina z trysky plyne shora dolů, tím pádem směřují jednotlivá vlákna na síť umístěnou pod odstředivkou. V průběhu sběrného procesu je povrch vlákna ošetřen ochranným prostředkem a pak jsou vlákna uložena na síť. [10, 16]



Obrázek č. 9 Výroba keramických vláken [10]

## 2.4. VLASTNOSTI ANORGANICKÝCH VLÁKEN

Vlastnosti anorganických vláken jsou závislé na jejich složení, na původu suroviny a také na jejich způsobu zpracování. [16]

### 2.4.1. SKLENĚNÁ VLÁKNA

Výhodou daných vláken je jejich vysoká tvrdost, odolnost vůči bakteriím, chemická a tepelná odolnost, vysoká pevnost v tahu (viz. tab. č.3). Mají specifický povrch s hydroxylovými skupinami, díky kterým lze vlákna smáčet. Vysoká pevnost se vysvětluje zmrazením izotropní struktury vysokoteplotní taveniny skla nebo přítomností pevného povrchu vlákna. Tento povrch se objeví při tažení a má tloušťku  $0,01 \mu m$ . Skleněná vlákna jsou lehce zpracovatelná díky jejich malému průměru. [14, 16]

Z vysoce alkalického AR-skla se vyrábějí vlákna s vysokou odolností vůči alkáliím, ale s nižší odolností vůči vodě než vlákna z E-skla. Vyšší chemickou odolnost mají vlákna z S-skla. Ztráta hmoty vláken při zpracování vodou je 0,02-0,05 g/m, a při zpracování v alkalickém prostředí 0,3-2,5 g/m. Vlákna z S-skla mají největší pevnost a vysokou tepelnou odolnost.

Tabulka č. 3. Vybrané vlastnosti skleněných vláken [14]

Vlastnosti	Druh skleněného vlákna		
	AR	E	S
Hustota [ $kg/m^3$ ]	2500	2540	2480
Max pevnost v tahu [Gpa]	3	3,5	4,6
Modul pružnosti [Gpa]	74	72	86
Koeficient tepelné vodivosti [ $W/m \cdot K$ ]	-	10,4	-
Tepelná kapacita [ $kJ/kgK$ ]	-	0,83	0,74
Objemový elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]	$2,03 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$9,05 \cdot 10^{10}$
Teplota měknutí [ $^{\circ}C$ ]	730	840	-
Dielektrická konstanta (při $22^{\circ}C$ a frekvenci 1MHz)	6,9	6,3	5,1

Nevýhodou je vysoký index křehkosti skla, který určuje pokles pevnosti skleněných vláken při výskytu povrchových vad. Kvůli tomu je nutná ochranná povrchová úprava skleněných vláken nanášením povrchových ochranných prostředků.

Jsou vynalezeny různé způsoby přípravy skla speciální použití, z kterého se vyrábějí vlákna s výbornými elektrickými vlastnostmi, odolnosti vůči teplotě, louhu a kyselinám, tvrdosti nebo pevnosti a schopností pohlcovat tvrdé záření. [14]

#### 2.4.2. ČEDIČOVÁ VLÁKNA

Čedičová vlákna mají stabilní vlastnosti v širokém rozsahu teplot. Jejich pevnost se částečně mění v závislosti na teplotě tavení. Nasákavost čedičů je 85x nižší než u skla, a tak destrukce skleněných vláken ve vlhkém prostředí proběhne rychleji než u čedičových (tab. č. 4). [9]

Tabulka č. 4. Vlastnosti čedičových vláken [9]

Vlastnosti		
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]		2600-2800
Průměr vláken [ $\mu\text{m}$ ]		10-18
Délka vláken [mm]		40-70
Teplota zpracování [ $^{\circ}\text{C}$ ]		450
Koeficient tepelný vodivosti [ $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ]		0,031-0,034
Teplota taní [ $^{\circ}\text{C}$ ]		1100
Nasákavost za dobu [%]		0,025
Chemická odolnost (ztráta hmotnosti) [%]	ve vodě	1,6
	v alkalickém prostředí	2,75
	v kyselém prostředí	2,2

Modul pružnosti čedičových vláken o průměru 13-18  $\mu\text{m}$  se pohybuje kolem 90 GPa.

Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken je uvedeno v tabulce č. 5. [9]

Tabulka č. 5. Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [9]

	Čedičové vlákno	Vlákno z E skloviny
Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	820	480
Minimální teplota použití [°C]	-260	-60
Teplota tavení [°C]	1450	1400
Teplota skelného přechodu [°C]	1050	825
Hustota [kg/m]	2750	2600
Pevnost v tahu [Mpa]	4840	3450
Modul pružnosti E [GPa]	89	77
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,7
Součinitel délkové teplotní roztažnosti [1/K]	5,5	5
Chemická odolnost- úbytek hmotnosti za 3 hod [%] vařící voda/vařící NaOH	0,2/5	0,7/6

### 2.4.3. UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna jsou velice pevná, mají malou hustotou a nízký koeficient tření (viz. tab. č. 6). Uhlíková vlákna mají černou barvu, jejich elektrická vodivost v ose vlákna je podobná elektrické vodivosti kovů.

Na rozdíl od skleněných vláken se uhlíková vlákna špatně smáčejí (nízká povrchová energie). Pro zvýšení pevnosti vláken je nutné zmenšit velikost krystalů, které mají dokonalou strukturu. Podle technologických postupů pro zvýšení pevnosti vláken se používá legování bórem za pomoci difúze plynové fáze ozařování vláken neutrony. [9]

Tabulka č. 6. Vlastnosti uhlíkových vláken na bázi PAN [9]

		PAN	
Teplota zpracování [°C]		1500	2000
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]		1,8-1,9	1,9-2
Obsah uhlíku, v % hmotnostních		93	99,5
Pevnost v tahu [MPa]		1500-3000	
Poměrné prodloužení při přetržení [%]		1-1,5	
Modul pružnosti [GPa]		150-300	
Teplota počátku ztráty hmotnosti na vzduchu [°C]		560	
Tepelná odolnost, ztráty hmotnosti [%]	350°C vzduchu	0	0
	400°C vzduchu	2,4	
Chemická afinita k epoxidovým pryskyřicím		horší	

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

- anizotropií mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykrystalického grafitu.
- křehkostí - prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken.
- záporným koeficientem délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$ , tj. při ohřevu se vlákno zkracuje. Ve směru kolmém má  $\alpha$  kladnou hodnotu a je větší než u vláken skleněných.
- v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor (jen  $1,9 \cdot 10^{-6} \Omega/\text{m}$  u nejtužších vláken)

Anizotropie se projevuje i v tepelné vodivosti. V podélném směru je největší u vysokomodulových vláken z mezofázových smol. [11]

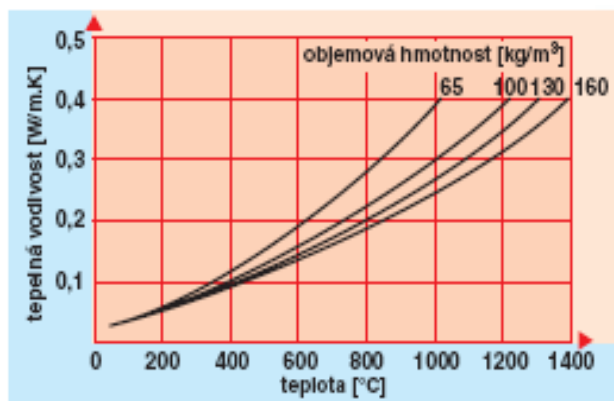
#### 2.4.4. KERAMICKÁ VLÁKNA

Jsou žáruvzdorná vlákna s nízkou tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou (obr. č.10). Keramická vlákna jsou vysoce odolná vůči teplotě a okysličování, elektricky nevodivá a snadno zpracovatelná. Jsou to vysoce pevná vlákna. (viz. tab. č. 7). [12]

Tabulka č. 7. Vlastnosti keramických vláken [12]

Vlastnosti	1260	1400	1430	1600
Klasifikační teplota	1260	1400	1430	1600
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	65/100/130/160	65/100/130/160	65/100/130/160	100/130
Teplota tání [°C]	1780	>1800	1740	>2000
Tepelná kapacita [kJ/kg.K]	1,13	1,13	1,03	1,16
Smrštění po 24 h [%]	3,5	2	1,8	1
při zkušební teplotě [°C]	1260	1300	1300	1600
Tepelná vodivost [W/m.K] (při OH = 130 kg/m <sup>3</sup> )				
při 400°C	0,09	0,09	0,09	0,08
600°C	0,14	0,14	0,14	0,12
800°C	0,2	0,2	0,2	0,17
1000°C	0,27	0,27	0,27	0,24
1200°C	0,34	0,34	0,34	0,33
1400°C	-	-	-	0,48
Chemické složení [%]				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45-49	52	33-36	72
SiO <sub>2</sub>	51-55	48	44-48	28
ZrO <sub>2</sub>	-	-	16-19	-





Obrázek č. 10 Závislost vodivosti na teplotě a objemové hmotnosti [12]

Keramická vlákna se v širokém rozsahu používají jako náhrada za azbest, kde se požaduje odolnost vůči vysokým teplotám. Odolnost keramických vláken vůči radiaci dovoluje jejich použití v kosmonautice a v jaderných elektrárnách. [15]

Tabulka č. 8. Vybrané vlastnosti různých vláken [15]

Vlastnosti		Skleněná vlákna	Minerální vlákna	Čedičová vlákna
Odolnost vůči vibraci (ztráta hmotnosti při vibraci) [%] při teplotě [ $\nu=50$ Hz, $A=1$ mm, $t=3$ hod]	200°C	12	40	-
	450°C	41	75	0,01
	900°C	100	100	0,35
Akustická charakteristika (koeficient zvukové pohltivosti)		0,8-0,92	0,75-0,95	0,95-0,99
Teplota zpracování [°C]		60...+250	180...+450	250...+700
Koeficient tepelné vodivosti [W/m°C]		0,038-0,042	0,04-0,047	0,031-0,034
Teplota tavení [°C]		600	850	1100
Chemická odolnost (ztráta hmotnosti) [%]	ve vodě	6,2	4,5	1,6
	v alkalickém prostředí	6	6,4	2,75
	v kyselém prostředí	38,9	24	2,2
Nasákavost za 24 hodiny [%]		1,7	0,95	0,02

## 2.5. TEPELNÁ ODOLNOST

Jednou z nejdůležitějších vlastností anorganických vláken je jejich vysoká tepelná odolnost, které organická vlákna nedosahují (tab. č. 9). Tepelná odolnost anorganických vláknových materiálů závisí především na druhu materiálu, z kterého byla vlákna

vyrobena, na délce působení teploty, na povrchové úpravě vláken a prefabrikátů i na použitých pojivech.

Skleněná vlákna vyrobená ze suroviny, která má chemické složení 71% SiO<sub>2</sub>, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8% CaO, 2,5% MgO a 16% Na<sub>2</sub>O, odolávají teplotám do 450°C.

Tepelná odolnost skleněných vláken se snižuje jejich povrchovou úpravou, protože prozatím nejsou vhodné lubrikační a apretační prostředky, které by odolávaly tak vysokým teplotám jako samo vlákno. [1]

*Tabulka č.9. Tepelná odolnost anorganických vláken a teploty měknutí [1]*

Materiál	Použitelnost do teplot [°C]	Teplota měknutí [°C]	Teplota tavení [°C]
Chrysolitový azbest vlákna	700	--	1500-1550
Skleněná vlákna lehce tavitelná	350-400	500-600	1100-1200
Skleněná vlákna těžce tavitelná	400-500	600-800	1300-1550
Čedičová vlákna	750-800	1000-1100	1200-1350
Křemenná vlákna	1200-1300	--	1600-1700

Pro zjišťování tepelné odolnosti anorganických vláken jsou speciální metody, založené na trvalé deformaci vzorku vláken vlivem zvýšené teploty [19]:

1. Při zkoušce je vláknový materiál zatížen tlakem 200 kg/m<sup>2</sup>. Tepelná odolnost se zjišťuje na přístroji, který se skládá ze dvou válcových nádob zasunutých do sebe. Do nádoby většího průměru se vloží zkoušený vzorek a zasunutím druhého válce se stlačí potřebným zatížením. Dna vnitřního menšího válce se dotýká kovová špička, nasazená na keramickou trubičku. Na druhém konci této keramické trubičky je připevněna kovová destička, spojená s indikátorem. Kovová špička má na vrcholu umístěn termočlánek. Souosé válce s vloženým vzorkem se ve speciální elektrické pídce zahřívají. Rychlost ohřevu je 5 °C za minutu. Při zahřívání indikátor ukazuje mírný pokles vnitřního válce. Při určité teplotě nastane náhlý prudký pokles a teplota těsně před poklesem určuje tepelnou odolnost zkoušeného vláknového materiálu.
2. Jednodušší metoda, jen orientační. Vzorek vláknového materiálu je vložen v žáruvzdorném kelímku do elektrické pícky, v níž se plynule zvětšuje teplota. Vzorek se posuzuje při každých 50 °C a teplota, při které nastane změna fyzikálních vlastností vzorku (například křehkost, spékání), udává jeho tepelnou odolnost. [19]

Všechna anorganická vlákna mají výbornou odolnost proti ohni a též silně tlumí oheň i plameny. Jejich měrné teplo je přibližně stejné. U suchých vláken je při 0 °C měrné teplo  $C_p=0,19-0,21$  kcal/kg °C. S obsahem vlhkosti se měrné teplo zvyšuje.

### 2.5.1. TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI

Použití anorganických vláken pro izolaci je založeno nejen na nízké tepelné vodivosti (kromě uhlíkových vláken), ale také na nízké objemové hmotnosti. Tepelná vodivost je pro izolační materiály jednou z nejdůležitějších vlastností, protože udává přímo číselně jakost izolačních hmot. Čím menší je tepelná vodivost, tím hodnotnější je izolace. [5]

Fyzikálně představuje tepelná vodivost množství tepla, které projde stěnou o tloušťce 1 m a ploše  $1\text{m}^2$  za 1 hodinu, je-li rozdíl teplot obou povrchů 1 °C. Má rozměr W/mK. Tepelné vodivosti anorganických vláken (s výjimkou uhlíkových) jsou velmi malé a pohybují se v rozmezí 0,026 až 0,040 W/mK pro střední teplotu 0 °C. Pro srovnání jsou uvedené do tabulky č. 10 tepelné vodivosti různých materiálů.

Doposud neexistuje způsob, jímž by se mohla měřit tepelná vodivost. Všechny známé měřicí metody jsou založeny na tom, že se měří povrchové teploty a množství proteklého tepla a z naměřených hodnot se vypočítává tepelná vodivost. Měřicí metody jsou vesměs založeny na ustáleném stavu. K měření tepelné vodivosti anorganických vláknových materiálů se používá hlavně těchto měřicích metod: Poensgenovy metody ČSN 72 7012; Van Rinsumovy metody ČSN 72 7011. [19]

Tabulka č. 10. Tepelné vodivosti různých materiálů [5]

Materiál	objemová hmotnost[kg/m <sup>3</sup> ]	tepelná vodivost [W/mK]	střední teplota [°C]
měď	8700	340	0
ocel	7500	45	0
voda	1000	0,5	0
beton	2400	1,1	10
sklo	2600	0,8	0
struska vysokopecní	400	0,1	0
pěnové sklo	200	0,055	0
bavlna	80	0,048	0
azbestová vlákna	300	0,06	100
	400	0,09	100
skleněná vlákna	100	0,033	0
čedičová vlákna	110	0,034	0

Tepelná vodivost vláknových materiálů závisí hlavně na těchto vlastnostech:

- na množství, velikosti a uspořádání vzduchových pórů
- na tloušťce a uspořádání vláken
- na teplotě
- na chemickém a molekulárním složení
- na množství granulí atd.

### 2.5.2. VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA TEPELNOU VODIVOST

Vzduch uzavřený v pórech izolačních vláknových hmot je rozhodující pro tepelnou vodivost materiálu. Protože tepelná vodivost vzduchu vzrůstá s teplotou. Je to způsobeno hlavně zvětšením přenosu tepla zářením. Vliv teploty na zvýšení tepelné vodivosti bude tím větší, čím větší budou póry (mezery). Větší vliv teploty na tepelnou vodivost při malých objemových vahách dokazuje také to, že minima tepelných vodivostí se vzrůstající teplotou se posunují k vyšším objemovým vahám.

Změna tepelné vodivosti probíhá pro vlákna podle křivky prohnuté nahoru, prohnutí bývá však mírné. Průběh lze vyjádřit rovnicí, která v nejjednodušším tvaru má jeden člen kvadratický:

$$\lambda = \lambda_0 + bt + ct^2 \quad (1)$$

kde:  $\lambda_0$  ..... tepelná vodivost izolace při teplotě 0°C

t ..... teplota

b, c ..... konstanty zjištěné měřením.

U vláknových materiálů pro určitý teplotní rozsah lze křivku nahradit přímkou a rovnice přejde v lineární tvar:

$$\lambda = \lambda_0 + bt \quad (2)$$

Při uměle vytvořené vlhkosti v laboratoři je prakticky nemožné kontrolovat rovnoměrné rozložení vlhkosti ve zkušebním vzorku. Nerovnoměrné rozložení vlhkosti ve vláknech vede k odchylkám při měření, které nelze vyhodnotit. Koeficient tepelné vodivosti tepelně izolačního materiálu při vlhkosti se vypočítá podle vzorce (3).

$$\lambda_{vlh} = \lambda_{suh} \left( 1 + \frac{\omega_{hm}}{100} * \Delta\lambda \right) \quad (3)$$

kde:  $\lambda_{suh}$  ..... koeficient tepelné vodivosti suchého materiálu [W/mK]

$\omega_{hm}$  ..... vlhkost materiálu podle hmotnosti [%]

$\Delta\lambda$  ..... zvětšení tepelné vodivosti materiálu [%], při zvětšení vlhkosti materiálu o 1 % podle hmotnosti

Aproximace experimentálních výsledků lineární funkce vypočítaných koeficientů tepelné vodivosti je vyjádřena vztahem (4).

$$l_k = l_{25k} + b * (t_{cp} - 25) \quad (4)$$

kde :  $l_{25k}$  ..... koeficient tepelné vodivosti materiálu při teplotě 25°C

$t_{cp}$  ..... průměrná teplota vrstvy materiálu, °C

$b$  ..... teplotní koeficient. Muže být daný lineární závislostí zvlášť pro teploty 25-125 a 125-300°C, nebo použitý polynom vyššího stupně. [2, 18]

Tepelnou vodivost izolačních materiálů lze zjistit v laboratoři pomocí přístroje USB-U (viz. obr. č. 11). Metoda měření spočívá v tom, že se vysušený materiál uloží do přístroje s konstantním proudem tepla, který směřuje kolmo ke vzorku. Přístroj změří tepelný odpor zkušebního materiálu. Tepelná vodivost se vypočítá dělením tloušťky materiálu a změřeného odporu. [2, 19]



Obrázek č. 11. Přístroj USB-U [19]

Závislost tepelné vodivosti vláken na průměrné tloušťce vláken při různých teplotách je vyjádřena těmito vztahy:

Střední tloušťka vláken [ $\mu$ ]	Analytické vyjádření závislosti [kcal/m hod °C]
15,5	$\lambda=0,035+0,000240t_{stř}$
19,8	$\lambda=0,036+0,000240t_{stř}$
31	$\lambda=0,038+0,000247t_{stř}$
35,2	$\lambda=0,038+0,000270t_{stř}$

Tato závislost se zjišťovala na skleněných vláknech při objemové váze 120 kg/m<sup>3</sup>. Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost anorganických vláknových materiálů je nepříznivý, vlhkostí se vodivost zvyšuje. Pohyb vlhkosti bývá ve směru tepelného toku. Tepelná vodivost vláknových materiálů závisí velmi nepatrně i na chemickém složení a molekulární stavbě vláken. Většina druhů anorganických vláken, která mají sklovitou strukturu, má nízkou tepelnou vodivost. [5]

## 2.6. ELEKTRICKÁ VODIVOST ANORGANICKÝCH VLÁKEN

Elektrické vlastnosti anorganických vláken mají význam tam, kde se těchto vláken používá jako elektroizolačního materiálu. Sklo a ostatní suroviny pro anorganická vlákna mají za normálních teplot nepatrnou elektrickou vodivost. Specifický odpor skel činí za normální pokojové teploty 10<sup>10</sup> až 10<sup>15</sup> Ω\*cm. Při vyšších teplotách se elektrická vodivost významně zvyšuje.

Sklo a jiné suroviny pro anorganická vlákna jsou za pokojové teploty pokryty vrstvičkou vlhkosti, která způsobuje povrchovou vodivost. Vlákna mají obrovský povrch a všechny změny relativní vlhkosti silně ovlivňují povrchovou vodivost. Při pokojové teplotě a normální povrchové vlhkosti teče proud téměř výhradně po povrchu vláken. Při teplotách nad 100 °C povrchová vodivost klesá vysušením a blíží se vlastní vodivosti materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno.

Bezalkalická skleněná vlákna mají specifický odpor:

při 20 °C a 80 % relativní vlhkosti 10<sup>12</sup> až 10<sup>13</sup> Ω\*cm,

při 250 °C a zanedbatelné relativní vlhkosti 10<sup>13</sup> Ω\*cm.

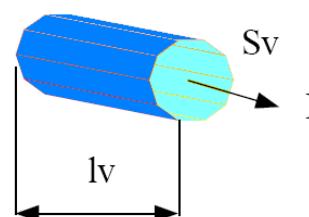
Povrchová vodivost silně vzrůstá s obsahem alkálií. Produkty hydrolýzy jsou hygroskopické, a tím vzrůstá povrchová vodivost. Vliv vlhkosti ovzduší na povrchovou

odpor vláken se omezí použitím dobré impregnační hmoty. Čím dokonalejší je napuštění, tím menší jsou změny izolačního odporu anorganických vláken. [5]

Elektrickou vodivost vláken lze vypočítat podle vzorce č. 5, je to poměr plošné hustoty proudu a intenzity elektrického pole. Taky platí Ohmův zákon co vyjadřuje vztah mezi elektrickým odporem, napětím a proudem z kterého lze vyjádřit elektrickou vodivost. [3,29]

$$\delta_E = \frac{I * l_v}{U * S_v} = \frac{G * l_v}{S_v} \quad (5)$$

Kde:  $\delta_E$  ..... elektrická vodivost [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]  
 $l_v$  ..... délka vlákna [cm]  
 $I/S_v$  ..... plošná hustota proudu [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]  
 $U/l_v$  ..... intenzita elektrického pole [F/m]



$$R = \frac{V}{I}; \quad G = \frac{I}{V} \quad (6)$$

Kde: V ..... napětí [V]  
I ..... proud [A]  
R ..... odpor [ $\Omega$ ]  
G ..... vodivost [siemens,  $S = \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2 = \Omega^{-1}$ ]

Z praktického hlediska má největší význam tzv. triboelektrizovatelnost (tj. vznik elektrického náboje třením), kde se pomocí triboelektrizačních přístrojů (např. STATELMET nebo EP-02) provádí nabíjení svazku vláken třením až do nasyceného stavu. Velikost vznikajícího elektrického náboje je velmi obtížné reprodukovatelně naměřit především proto, že se v podstatě jedná o nestacionární dynamický děj.

Současně s nabíjením vláken vždy dochází k odvodu náboje do okolí, tj. k vybíjení. Tento děj je ovlivněn zejména vlhkostí vzduchu, vlhkostí měřeného materiálu a jeho dalšími vlastnostmi. Elektrostatická měření proto vyžadují přísnou klimatizaci za co možná nejnižší relativní vlhkosti vzduchu ( $\varphi = 20-30 \%$ ), kdy je možno lépe rozlišit rozdílný sklon materiálů k nabíjení.

Tyto podmínky jsou dosti vzdáleny standardním podmínkám v textilních provozech i textilním zkušebnictví ( $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 65 \%$ ). Po většinou roku je technicky

dost náročné docílit nízkých hodnot vlhkosti vzduchu, proto jsou elektrostatická měření doporučována 40 % vlhkost vzduchu jako užitečný kompromis. [20]

### 2.6.1. ZPŮSOBY VÝPOČTU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI TEXTILIE A VLÁKEN

#### A) Vybíjení textilie

Plošný náboj s plošnou hustotou  $\sigma$ , nacházející se na povrchu textilie, vytváří elektrostatické pole. Vektor intenzity tohoto pole je kolmý k povrchu a má velikost podle vzorce 7.

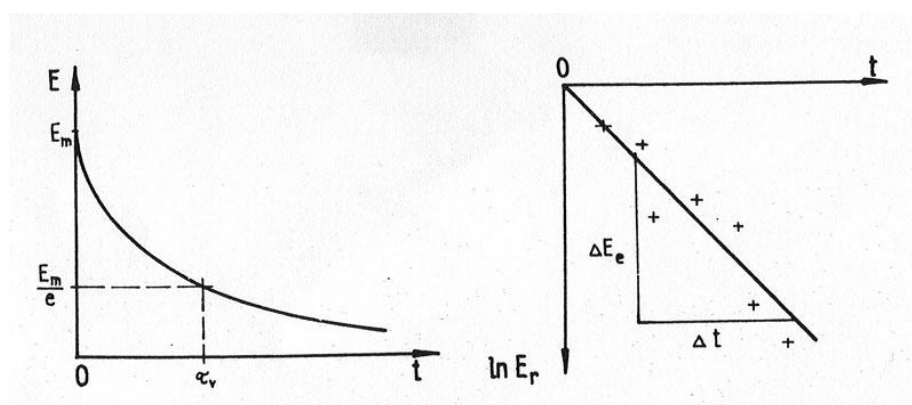
$$E_m = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

Kde:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ..... permitivita vakua, [F/m].

V důsledku nenulové elektrické vodivosti vzduchu i textilie dochází k vybíjení náboje, tj. k poklesu jeho hustoty a podle vztahu (7) i intenzity elektrického pole. Vybíjení elektrostatického náboje je poměrně složitý jev. Nejjednodušeji je modelováno vybíjením kondensátoru přes odpor. Časový průběh intenzity elektrostatického pole je podle tohoto modelu popsán vztahem (8).

$$E = E_m \cdot e^{\frac{-t}{\tau_v}} \quad (8)$$

Kde:  $\tau_v$  ..... je vybíjecí časová konstanta (viz. obr. č. 12 a).



Obrázek č. 12. Vybíjení textilie [20]

Fyzikální význam vybíjecí časové konstanty plyne ze vztahu (8), jestli  $t = \tau_v$ , pak je  $E = E_m/e = 0,37E_m$ . Vybíjecí časová konstanta  $\tau_v$  je tedy doba, během níž klesne intenzita elektrického pole na  $1/e$ , tj. asi 37 % jeho počáteční hodnoty. Na základě této



definice lze z vybíjecí křivky na obr. 12 jednoduchou konstrukcí získat odhad vybíjecí časové konstanty. Přesnější stanovení vybíjecí časové konstanty je grafické. Vztah 8 lze upravit na:

$$E_r = \frac{E}{E_m} = e^{\frac{-t}{\tau_v}} \quad (9)$$

Kde:  $E_r$  .....relativní intenzita elektrického pole, která klesá během vybíjení od 1 do 0, [F/m]

Po zlogaritmování tohoto vztahu získáme lineární závislost  $\ln E_r$  na čase (10).

$$\ln E_r = -\frac{t}{\tau_v} = \ln \frac{E}{E_m} \quad (10)$$

Tato závislost je na obr. č. 12b. Protože podle definice  $0 < E_r < 1$ , je  $-\infty < \ln E_r < 0$  a  $t > 0$ ,  $\tau_v > 0$ , musí být v rovnici (10) znaménko minus. Směrnice přímky je  $-\frac{1}{\tau_v}$ , tedy záporná, přímka je klesající. Určení časové konstanty je znázorněno na obr. č. 12b, kde je přes počáteční hodnoty  $E_m$  vyjádřen přirozený logaritmus. [20]

## B) Nabíjení textilie

Nabíjení textilie je jev nepoměrně složitější než její vybíjení, neboť se při něm uplatňuje množství neopakovatelných a nereprodukovatelných dějů, spojených se vznikem elektrostatického náboje. I když pro to nejsou žádné fyzikální důvody, používá se k popisu nabíjecího děje, snad z analogie k vybíjecímu ději, model nabíjení kondensátoru přes odpor. Časový průběh intenzity elektrického pole je dán vztahem (11).

$$E = E_m \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau_n}}) \quad (11)$$

Kde:  $E_m$  ..... je maximální intenzita elektrického pole po skončení procesu nabíjení [F/m]

$\tau_n$  ..... je nabíjecí časová konstanta

Časový průběh intenzity elektrického pole je na obr. č. 13 a. Po dosazení  $t = \tau_n$  do vztahu (11) se stává zřejmým význam nabíjecí konstanty  $\tau_n$  je to doba, během níž

vzroste intenzita elektrického pole z nulové hodnoty na hodnotu  $E=E_m(1-1/e)=0,63E_m$ . Přesnější určení nabíjecí konstanty je grafické. Vztah 11 lze upravit na:

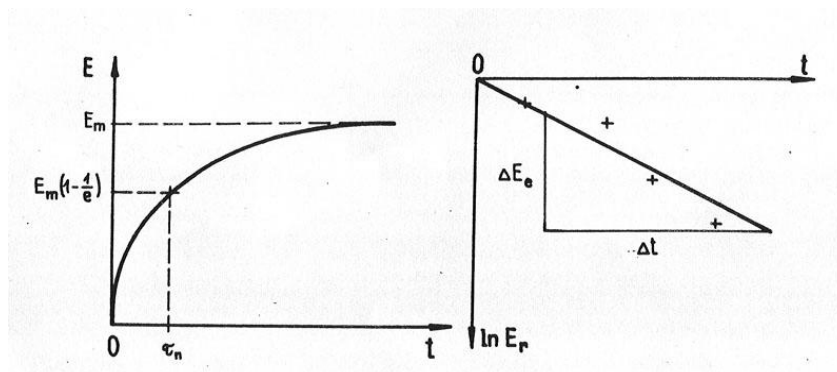
$$E_r = \frac{E_m - E}{E_m} = e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (12)$$

Kde:  $E_r$  .....relativní intenzita elektrického pole, která klesá během vybíjení od 1 do 0 [F/m]

Po zlogaritmování tohoto vztahu získáme lineární závislost  $\ln E_r$  na čase (13).

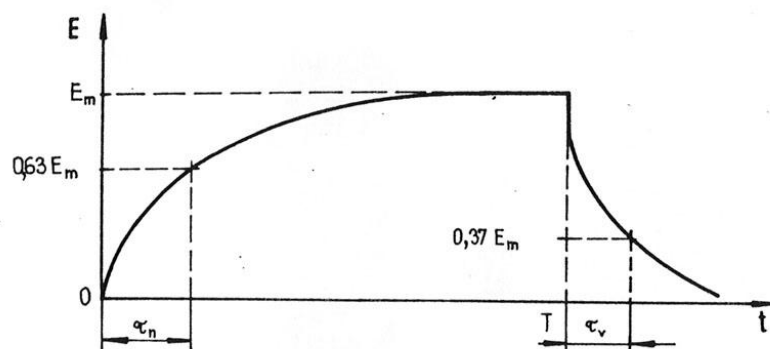
$$\ln E_r = -\frac{t}{\tau_n} = 1 - \frac{E}{E_m} \quad (13)$$

Tato závislost je na obr. č. 13 b. Protože podle definice  $0 < E_r < 1$ , je  $-\infty < \ln E_r < 0$  a  $t > 0$ ,  $\tau_n > 0$ , musí být v rovnici (13) znaménko minus. Směrnice přímky je  $-\frac{1}{\tau_n}$ , tedy záporná, přímka je klesající. Určení časové konstanty je znázorněno na obr. č. 13 b, kde je přes počáteční hodnoty  $E_m$  vyjádřen přirozený logaritmus. Experimentální hodnoty  $\ln E_r$  jsou vynášeny v závislosti na čase. Tyto body by měly přibližně ležet na přímce, jisté odchylky jsou způsobeny poměrně malou přesností měření, což se projeví zejména v počátečních bodech přímky.



Obrázek č. 13. Nabíjení textilie [20]

Děje nabíjení a vybíjení nelze oddělit, poněvadž k vybíjení dochází neustále. Zpravidla proto uvažujeme cyklus, který spočívá v tom, že nabíjecí děj probíhá určitou, dostatečně dlouhou dobu  $T$  podle obr. č. 14. Na počátku intenzita elektrického pole stoupá, pak dosáhne ustálené hodnoty  $E_m$  a dále se nemění. Po skončení nabíjecího děje v okamžiku  $T$  dochází k vybíjení, intenzita elektrického pole klesá z počáteční hodnoty  $E_m$  na zanedbatelnou hodnotu po uplynutí dostatečně dlouhé doby.



Obrázek č. 14. Cyklus nabíjení a vybíjení textilie [20]

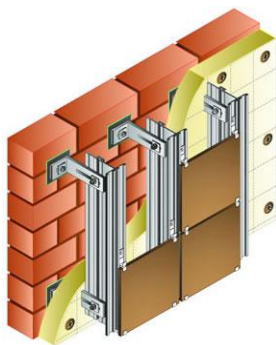
Z časového průběhu na obr. č. 14 lze odhadnout nabíjecí a vybíjecí časovou konstantu. K přesnějšímu určení těchto konstant se používá grafické metody. Graf na obr. č. 14 je svislou přerušovanou čarou (v bodě T) rozdělen na dva grafy a ty se zpracují podle výše uvedených vztahů. [20]

## 2.7. POUŽITÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN

Díky svým vlastnostem se anorganická vlákna používají:

- v textilním průmyslu (pro výrobu jiných vláknových výrobků, filtrů)
- ve stavebnictví
- v automobilovém a leteckém průmyslu
- pro těsnění teplotních švů
- pro tepelnou izolaci
- jako surovina pro výrobu tmelu (leštidla)

Tepelná izolace musí mít dlouhou životnost, musí být nehořlavá a mít vysokou chemickou a biologickou odolnost, zachovávat stabilní tvar i vysoké tepelně izolační vlastnosti. A taky odvádět vodní páru a vlhkost do vzduchu. Dlaždice s takovými vlastnostmi se vyrábějí na osnově anorganických vláken pro tepelnou izolaci staveb (viz. obr. č. 15). Jsou to nepříznivé prostředí pro vznik plísně s vysokými, tepelnými a hlukovými vlastnostmi. [15]



Obrázek č. 15. Dlaždice pro tepelnou izolaci [15]



Obrázek č. 16. Filtr [16]

Mletá uhlíková vlákna jsou používána pro dosažení elektrické vodivosti plastu a jako výztuž vstříkovaných termoplastů. Ani nejtužší grafitizovaná vlákna nelze považovat za čistě uhlíková, obsah uhlíku nedosahuje 100 %.

Skleněná vlákna mají díky své pórovité struktuře nízký koeficient tepelné vodivosti (0,03-0,036 [W/mK]). Tkaniny ze skleněných vláken se používají v chemickém průmyslu pro filtraci kyselinových a alkalických roztoků, pro očištění vzduchu a horkých plynů. Doba použití filtru ze skleněných vláken je značně větší než u ostatních vláken (obr. č.16). Pro výrobu filtru se používají anorganická vlákna malých průměrů spojených speciálními smolami. Filtrační vložka 3 se nachází mezi horní a dolní nylonovou sítí 2 a 4. Horní spirálová stužka 1 zajistí rovnoměrný proud filtračního plynu filtrem a určí jeho životnost. Sám filtr je nasazen na buben 5, podle kterého se určuje velikost filtru. [16]

Z vysoce pevných vláken z S-skla se vyrábějí kompozity pro letecký průmysl. Apretování směsí chrání skleněná vlákna před vlivem vlhkosti, a tím se zvyšuje jejich odolnost vůči atmosférickým činitelům. [9]

Velice důležitou vlastností u anorganických vláken je jejich odolnost vůči vibracím, která má vliv na dobu životnosti výrobku. Vibracím a akustické zátěži podléhají všechny stavby a dopravní technická zařízení. (viz. tab. č. 11). Lze poznamenat, že pro skleněná i čedičová vlákna jsou uvedeny nejlepší hodnoty zmíněných vlastností. Mohou se lišit s tabulkovými podle druhů, značek nebo složení vláken. Čedičová vlákna mají stálou strukturu, a tedy i neměnné vlastnosti.

Ve všech letadlech se používá izolace jenom z ultratenkých čedičových vláken, která se nepráší a jsou odolná vůči častým změnám teploty. [17]

Tabulka č. 11. Vybrané vlastnosti skleněných a čedičových vláken [17]

Vlastnost		Skleněná vlákna	Čedičová vlákna
Odolnost vůči vibraci (ztráta hmotnosti při vibraci) [%] při teplotě [ $\nu=50$ Hz, $A=1$ mm, $t=3$ hod]	200°C	12	-
	450°C	41	0,01
	900°C	100	0,35
Akustická charakteristika (koeficient zvukové pohltivosti)		0,8-0,92	0,95-0,99
Teplota zpracování [°C]		-60...+250	-250...+700
Koeficient tepelné vodivosti [W/m°C]		0,038-0,042	0,031-0,034
Teplota tavení [°C]		600	1100
Chemická odolnost (ztráta hmotnosti) [%]	ve vodě	6,2	1,6
	v alkalickém prostředí	6	2,75
	v kyselém prostředí	38,9	2,2
Nasákavost za 24 hodiny, [%]		1,7	0,02

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části práce byla vytvořena metodika pro stanovení elektrických vodivostí anorganických vláken, která využívá kombinace experimentálních měření a numerických simulací. V experimentu byly použity vzorky termoplastického kompozitu vyztuženého anorganickými vlákny. Na základě důkladné strukturní analýzy byl vytvořen vícestupňový geometrický model kompozitu, který slouží jako vstupní parametr do numerické simulace elektrických vlastností studovaného materiálu. [4] Experimentálně byly naměřeny elektrické vodivosti studovaných kompozitních destiček a samotného termoplastu (nevyztužená destička). Experimentální data byla využita pro kalibraci numerického modelu a stanovení elektrických vodivostí anorganických vláken.

#### 3.1. ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

##### 3.1.1. ELEKTRICKÉ POLE

Elektrické pole existuje v okolí každého elektricky nabitého tělesa, je to prostor, kde působí elektrické síly; je charakterizováno vektorovou fyzikální veličinou zvanou intenzita elektrického pole. Intenzita elektrického pole v daném místě pole je určena podílem elektrické síly, která působí na kladný bodový náboj, a velikostí tohoto náboje má pro kladný náboj stejný směr jako směr elektrické síly. [3]

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (14)$$

Kde:  $\vec{E}$  .....intenzita elektrického pole [ $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ ], [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\vec{F}$  .....elektrická síla působící na kladný bodový náboj [N]

$q$  .....elektrický náboj [C]

Je-li náboj záporný, jsou směry vektorů síly a intenzity opačné. Má-li intenzita  $\vec{E}$  ve všech místech elektrického pole stejnou velikost a směr, jde o homogenní (stejnorodé) pole. V okolí bodového náboje je elektrické pole radiální, intenzita  $\vec{E}$  tohoto pole má směr vycházející z nebo vstupujícího do náboje. Velikost intenzity elektrického pole se zmenšuje s druhou mocninou vzdálenosti od bodového zdroje, který pole vytváří. Tvar elektrického pole se modeluje pomocí siločar, což je myšlená

čára, jejíž tečna určuje v každém místě pole směr intenzity elektrického pole. Siločáry mají tyto tři základní vlastnosti:

1. jsou spojité, začínají na kladném a končí na záporném náboji (jejich směr je shodný se směrem intenzity elektrického pole);
2. vstupují a vystupují kolmo k povrchu elektricky nabitého tělesa;
3. navzájem se nikde neprotínají.

Působením elektrické síly na náboj v homogenním elektrickém poli se vykoná práce na přemístění náboje. Vykonaná práce nezáleží na trajektorii, ale jen na vzdálenosti počátku a konce pohybu náboje. Veličina elektrické napětí je definována jako podíl práce, kterou vykonala elektrická síla na přemístění náboje a tohoto náboje:

$$U = \frac{W}{q} \quad (15)$$

Kde:  $U$  ..... elektrické napětí [V]

$W$  ..... práce kterou vykoná elektrická síla [N]

$q$  ..... elektrický náboj [C]

Elektrická potenciální energie  $E_p$  náboje je určena prací, kterou vykoná elektrická síla při přemístění náboje z daného místa na povrch tělesa. Pro elektrický potenciál platí vztah 16.

$$\varphi = \frac{E_p}{q} \quad (16)$$

Kde:  $\varphi$  ..... elektrický potenciál [V]

$E_p$  ..... potenciální energie [J]

$q$  ..... elektrický náboj [C]

Pohybuje-li se bodový náboj ve směru shodným s elektrickou silou, jeho potenciální energie se zmenšuje. Pohybuje-li se bodový náboj ve směru opačném, než je směr elektrické síly, jeho potenciální energie se zvětšuje. Elektrický potenciál  $\varphi$  je fyzikální veličina popisující elektrické pole, stejně jako napětí je to skalární veličina. Rozdíl potenciálů dvou bodů A, B elektrického pole je roven elektrickému napětí mezi těmito body (vzorec 17).

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (17)$$

Kde:  $\varphi_A$  ..... elektrický potenciál bodů A, [V]

$\varphi_B$  ..... elektrický potenciál bodů B, [V]

Množina bodů elektrického pole o stejném potenciálu tvoří tzv. ekvipotenciální plochu (hladinu se stejným potenciálem). Všechny siločáry elektrického pole jsou kolmé k ekvipotenciálním plochám. [3, 28]

### 3.1.2. POLARIZACE A PERMITIVITA

Dielektrikum je izolant, umístěný mezi vodivými elektrodami kondenzátoru. V elektrickém poli se dielektrikum polarizuje. Působením sil elektrického pole při polarizaci zaujímají elektricky vázané náboje dielektrika nové rovnovážné polohy. Tyto polohy jsou v malé vzdálenosti od původních rovnovážných poloh. Je to proces, při kterém dochází k narušení symetrie rozdělení elektrických nábojů a vzniku dipólů.

U nepolárních molekul přestává být těžiště kladných a záporných nábojů společné, neutrální molekuly vytvářejí dipóly a získávají elektrický moment. U polárních molekul se natáčí jednotlivé dipóly ve směru elektrického pole. Původní trvalý elektrický moment se zvětšuje o přídavný moment.

Po zániku elektrického pole se částice vracejí do původní polohy. Pohybem částic vzniká až do okamžiku rovnováhy elektrický, tzv. posuvný proud. Přitom dochází v dielektriku ke ztrátám energie.

Permitivita izolantu charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav izolantu.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (18)$$

kde:  $\varepsilon$  ..... absolutní permitivita [ F \* m<sup>-1</sup> ]

$\varepsilon_0$  ..... permitivita vakua ( 8,85 \* 10<sup>-12</sup> ), [ F \* m<sup>-1</sup> ]

$\varepsilon_r$  ..... poměrná permitivita [ F \* m<sup>-1</sup> ]

Poměrná permitivita charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Závisí na druhu polarizace na vnitřní stavbě izolantu a na polarizovatelnosti atomů a molekul. Může se měnit v závislosti na teplotě, frekvenci i na intenzitě elektrického pole.

Po vložení dielektrika nebo izolantu do elektrického pole se v tomto materiálu určitá část energie přeměňuje v neužitečné teplo je to dielektrické ztráty a materiál se ohřívá. Je to jev většinou nežádoucí, vyplývají z něho zhoršené funkční vlastnosti (např.



zvětšení vodivosti). Někdy žádoucí – např. k sušení některých látek dielektrické povahy.

Dielektrické ztráty závisejí na materiálu, ale i na pracovním režimu. Ve stejnosměrném elektrickém poli jsou dány jen vodivostí materiálu.

Elektrický průraz – vzniká nárazovou ionizací atomů izolantu. Tuto ionizaci způsobují elektrony uvolněné při velké intenzitě pole z řádných vazeb mřížky a urychlené elektrickým polem. Následkem nárazové ionizace vzniká v určitém místě lavina elektronů, izolant ztrácí svoje elektroizolační vlastnosti a stává se elektricky vodivým (Lavinový průraz).

Tepelný průraz – může nastat u pevných izolantů s velkým činitelem ztrát. Takový izolant se elektrickým poli následkem velkých dielektrických ztrát nadměrně ohřívá, neboť vzniklé teplo nestačí odvádět svým povrchem do okolí. Účinkem vysoké teploty se izolant v některém místě poruší (začne uhelnatět, tavit se nebo prohořívát) až se stane vodivým. Tepelný průraz na rozdíl od průrazu elektrického probíhá pomalu. [28] Náboje na povrchu dielektrika působí svou intenzitou elektrického pole  $\vec{E}_i$  proti intenzitě vnějšího elektrického pole  $\vec{E}_e$  a zeslabují toto pole, výsledná intenzita  $\vec{E}$  je tedy menší a má směr intenzity  $\vec{E}_e$ , veličina  $\varepsilon_r = \frac{E_e}{E}$  se nazývá relativní permitivita dielektrika.

### 3.1.3. VLASTNOSTI IZOLANTU

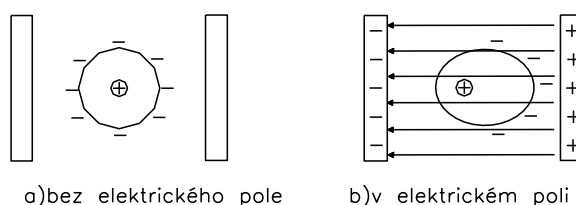
Izolanty – schopnost klást velký odpor průchodu elektrického proudu  $I$ . Používají se k izolování elektrické vodivých těles s různým potenciálem. Jsou to látky, které na rozdíl od kovů neobsahují volně pohyblivé elektrony, a proto nevedou elektrický proud. Skládají se z atomů, molekul nebo iontů, které obsahují elementární částice. Tyto částice s elektrickým nábojem jsou vázány na určitá místa mřížky. Neexistuje dokonalý izolant. Vždy obsahují malé množství  $+$  a  $-$  iontů a elektronů, které nejsou vázány. Měrná elektrická vodivost  $\gamma$  se s rostoucí teplotou zvětšuje.

Molekuly jsou vázány iontovou nebo kovalentní vazbou. Podle způsobu uspořádání elektricky vázaných nábojů se rozlišují molekuly nepolární a polární.

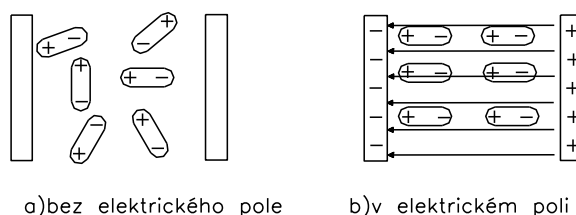
- Nepochární (neutrální) molekuly se vyznačují souměrným rozložením kladných a záporných nábojů. Těžiště nosičů obou druhů nábojů splývají. Příkladem jsou molekuly prvků, nebo některých sloučenin (metan, etylén, a jiné).
- Polární (dipólové) molekuly se vyznačují nesouměrným rozložením kladných a záporných nábojů. Takové molekuly vytvářejí i v nepřítomnosti elektrického pole elektrické dipóly. Dipóly jsou v izolantu nepravidelně uspořádány, takže jejich účinek se navzájem ruší. Příkladem je molekuly kyseliny solné nebo vody. [28]

Vložíme-li izolant (dielektrikum) do elektrického pole, nemůže dojít k přemísťování volných elektronů, protože neobsahuje volné elektrony. Po vložení izolantu do elektrického pole dojde k posunutí kladného jádra a záporného elektronového obalu podél siločar tak, že jádro se posune ve směru intenzity a obal proti směru. V důsledku polarizace dielektrika vzniká na povrchu izolantu tenká vrstva kladných (kde siločáry vystupují z izolantu, tedy kde je záporný pól) a záporných nábojů (v místech, kde siločáry vstupují do dielektrika). Náboje které vznikají na povrchu izolantu polarizací dielektrika, nelze z látky odvést, jsou na elektrické dipóly vázány (viz. obr. č. 17). Celkový elektrický náboj se vzájemným zelektrováním v izolované soustavě těles nemění.

#### Nepochární dielektrika



#### Polární dielektrika



Obrázek č. 17. Mřížka izolantu v elektrickém poli [28]

Elektrická vodivost izolantu lze vysvětlit existencí v nich malého množství volných nabytých částic: iontu a elektronu. Nejvíce typické pro elektrické izolační materiály je iontová elektrická vodivost která vzniká z důvodu přítomnosti nečistot. U dielektriku s iontovým charakterem elektrické vodivosti se zachová zákon Faradea-úměrnost mezi uplynulými hodnotami přes izolace elektřiny a uvolněními při

elektrolýze látek (prostředku). Při zvyšování teploty elektrický odpor izolačních materiálů se klesá co je popsáno vzorkem č. 19.

$$\rho = \rho_0 e^{A + \frac{B}{T}} \quad (19)$$

Kde:  $\rho_0$ , A a B ..... jsou konstanty pro daný materiál

T ..... teplota [K]

Odpor izolačních materiálů může klesat se zvýšeným napětím díky vzniku v něm prostorového náboje. Vznikající při tom dodatečná elektrická vodivost vede ke zvýšení elektrické vodivosti materiálů. Existuje vztah mezi vodivostí a napětím (zákon Frenkela) (viz. vzorek č. 20). Za ideálních podmínek vodivost izolačních materiálů se rovna nule. [29]

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha \sqrt{E}} \quad (20)$$

Kde:  $\gamma_0$  ..... vodivost ve slabých místech

$\alpha$  ..... konstanta

### 3.2. STUDOVANÝ MATERIÁL - KOMPOZIT E-sklo/PP

#### Výztuž

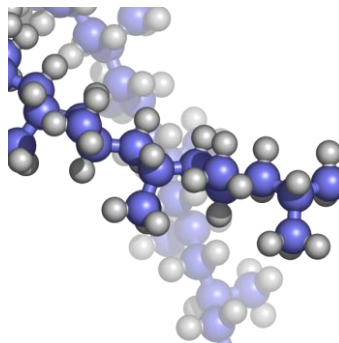
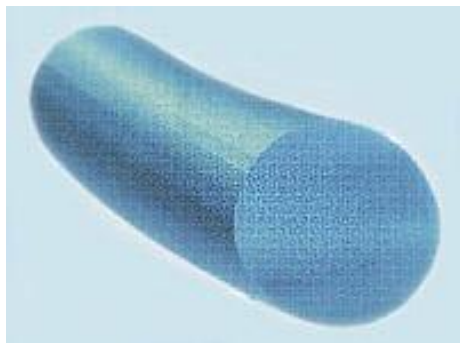
Výztuž studovaného kompozitního materiálu je tvořena skleněnými vlákny, jejichž struktura a vlastnosti byly popsány v kapitole 2. Kompozitní výztuž je ve formě rovingové tkaniny v plátňové a keprové vazbě. [1]

#### Matrice

Polypropylenová (PP) matrice patří mezi termoplastické matrice, u kterých se předpokládá, že jejich mikrostruktura v čistém stavu (bez výztuže) je stejná jako při vyztužení vlákny. [27] Proto bylo možné vyrobit čistou PP destičku a změřit její elektrickou vodivost. Tato hodnota se stala jedním ze vstupních parametrů do numerického modelu.

Vysoce krystalický izotaktický PP se připravuje způsobem koordinační stereospecifické polymerace propylénu  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$   $((\text{C}_3\text{H}_6)_n)$  s využitím Ziegler-Nattových katalyzátorů ( $\text{TiCl}_3$ ,  $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ ) při teplotě  $100^\circ\text{C}$  a tlaku 3MPa (obr. č. 18).

Na polypropylén působí agresivně vysoce oxidačně působící chemikálie jako hydroperoxid, kyselina dusičná, halogeny atd., a také organická rozpouštědla, jejichž báze obsahuje chlor.



Obrázek č.18. PP vlákno a granulovaný polypropylen [26]

Polypropylén dobře odolává biologickému působení, má nulovou nasákavost, takže jeho vlastnosti jsou jak ve vysušeném, tak ve vlhkém stavu srovnatelné.

- ✓ Maximální stupeň krystalizace polypropylenu je 73-75 %
- ✓ Hustota 920 [kg/m<sup>3</sup>]
- ✓ PP má vysoký elektrický odpor (rezistivitu), ale je málo náchylný ke tvorbě elektrostatického náboje (nízká polárnost)
- ✓ Elektrická rezistivita polypropylenu je 10<sup>16</sup> [Ω\*cm]
- ✓ Teplota měknutí polypropylénu je 140 - 160°C, teplota tavení je 165 - 175°C
- ✓ Bod varů je 590°C
- ✓ Měrné teplo je 1,7\*10<sup>3</sup> – 2,1\*10<sup>3</sup> [J\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>]
- ✓ Tepelná vodivost je 0,08 – 0,11 [J\*m<sup>-1</sup>\*s<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>], [26]

K vyztužení termoplastických matric se používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová nebo jejich kombinace (hybridní kompozity). [25]

### 3.3. OBRAZOVÁ ANALÝZA

Obrazová analýza byla využita při zkoumání struktury kompozitu na mikro-, mezo- i makroúrovni. Získané mikrofotografie byly využity pro kvantitativní analýzu studované struktury a jako podklad pro přípravu geometrických modelů kompozitní struktury, které jsou dalším vstupním parametrem pro numerické simulace.

Aplikace obrazové analýzy úzce souvisí s daným předmětem zkoumání, a proto nelze přesně vymezit přesný teoretický postup. Odlišnost od lidského hodnocení a specifická počítačová zpracování obrazu způsobuje, že interdisciplinární analýza se musí projevit už na začátku při přípravě a snímání experimentálního materiálu a na konci při interpretaci naměřených dat. [21]

Software Lucia G pro obrazovou analýzu je systémem firmy Laboratory Imaging s.r.o., která zpracovává a analyzuje barevný nebo černobílý obraz. Lucia G pracuje až po nainstalování operačního systému Windows 3.x. Program používá 752x548 obrazových bodů (pixelů) na zobrazení obrazů a umožňuje vlastní zobrazení na display.

### **3.3.1. TYPY OBRAZŮ**

Lucia G zpracovává obrazy, jejichž hloubka je 24 bodů. Rozlišujeme dva základní typy obrazů- binární (barevné) a šedé obrazy jsou odvozené. [23]

#### Binární obrazy

Binární obrazy mají možné hodnoty, 0 a 1 pro objekty a strukturu. Binární obrazy se tvoří funkcí threshold a často o nich mluvíme jako o segmentovaných barevných obrazech, vzniklých segmentací. Používají se pro měření tvaru a velikosti.

#### Barevné obrazy

Barevné obrazy se skládají ze tří složek RGB, které představují intenzitu červené, zelené a modré složky. Hodnoty pixelů pro každou složku jsou v intervalu od 0 do 255 pro Lucia G. Pro systém Lucia je to nejpřirozenější typ obrazu, sejmutý digitalizační kartou. Ke zpracování barevného obrazu se často používá pouze intenzivní složka barevného obrazu, odstín (HUE) a sytost (SATURATION) zůstávají u typických kontrastujících a ostřících transformací stejné.

#### Šedé obrazy

Šedé obrazy jsou obrazy odvozené. Hodnoty pixelů se mění od 0 do 255 pro Lucia G, ale jsou v každém pixelu identické pro všechny tři složky. Šedé obrazy nejsou vlastní systémem Lucia, ale mohou se vytvářet několika transformacemi, např. separací složek z RGB reprezentace. Protože šedé obrazy jsou speciálním případem barevných obrazů. Lze se na ně odvolávat jako na obrazy barevné.

Měření je nejdůležitějším úkolem obrazové analýzy a provádí se podle interní normy č.23-107-01/01. Začíná kalibrací systému Lucia, následuje kvantitativní vyhodnocení obrazu (volba vhodně statistiky-texturní nebo objektová; výběr příznaků; definování měřicího rámu; masky a obrazů, které mají být zahrnuty do měření) a končí vyhodnocením a prezentací dat.

### **3.3.2. PODSTATA MĚŘENÍ**

Experimentální měření elektrických vlastností kompozitních vzorků bylo provedeno na přístroji HP 4339B High Resistance Meter v laboratoři elektromagnetických vlastností textilií na Katedře textilních materiálů TUL. Tento přístroj je využíván pro měření elektrických odporů a s nimi souvisejících parametrů u nevodivých nebo málo vodivých materiálů. [4]

Analýza struktury kompozitních vzorků na mikro-, mezo- a makroúrovni byla provedena v laboratořích obrazové analýzy KTM s využitím následujících zařízení:

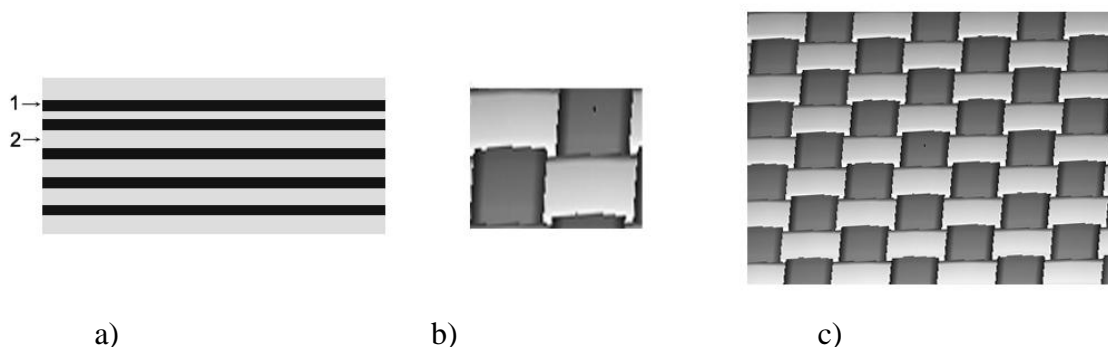
- optický mikroskop NIKON ALPHAPHOT-2 YS 2 (objektiv 4.-0.6) (analýza makro- a mezostruktury), jehož součástí byla fixní kamera CCD COHU, která přenášela obraz snímáný přímo ze sledovaného vzorku tkaniny na obrazovku počítače
- rastrovací elektronový mikroskop Vega Tescan (analýza mikrostruktury)
- stolek umožňující horizontální a vertikální posuv vzorku
- software Lucia G, systém firmy Laboratory Imaging pro zpracování a analýzu obrazu

#### Zpracování obrazů

Nasnímané obrazy byly upravené pomocí kontrastu a dále byla provedena segmentace obrazů pomocí naprahování (Treshold). Naprahování je nejjednodušší transformace převádějící šedý obraz na binární a je tedy zároveň základním segmentačním algoritmem (oddělení plochy prosvětlené a plochy zakryté přizemi). Po segmentaci následovalo měření. Nejdříve však musí být definován měřicí rámeček (který byl pro všechna měření fixní), druh měření (texturní) a příznaky měření.

#### Návrh vícestupňového modelu

Na základě důkladné strukturní analýzy byl navržen třístupňový geometrický model studované kompozitní struktury (viz. obr. č. 19), který byl využit jako vstupní parametr pro numerický výpočet elektrické vodivosti a přidružených parametrů u kompozitu sklo-PP.



Obrázek č.19 Třístupňový geometrický model studované struktury:  
a) mikroúroveň, 1 - vlákna, 2 - matrice, b) mezoúroveň, vazná buňka ve tkanině, c) kompozitní destička

### 3.4. VYTVOŘENÍ NUMERICKÉHO MODELU

Pro vytvoření numerického modelu je možné využít řadu nástrojů. [24, 30] V našem případě byl model vytvořen pomocí kombinace funkcí programu COMSOL Multiphysics a MATLAB.

Pomocí obrazové analýzy byly získány rozsáhlé databáze obrázků povrchu kompozitu (viz. obr. č. 20). Zhotoveno 50 snímků pro každý vzorek kompozitu.



Obrázek č. 20. Plošné zakrytí kompozitu E-sklo/PP a) v keprové vazbě  
b) v plátnové vazbě

Ke zpracování obrázků bylo v programu MATLAB vytvořeno makro jako zápis posloupností příkazů programu vykonávající stanovenou činnost. Tato posloupnost se dá uložit jako samostatný soubor dat a jako s takovým s ním pracovat. Jak bylo už řečeno výše, je nutné nejdříve vytvořit m-soubor, do kterého se načtou naměřená data ve formátu JPEG a pomocí příkazů (uvedených ve schématu č. 1) se uloží ve formátu mat (\*.m.).

Nejdříve se uvádí počet obrázků pro zpracování:

```
for i = 0 : 49
```

Dále se uvádí název obrázku pro zpracování (v našem případě název obrázku začíná V2\_ pak jde pořadí každého obrázku):

```
v = genvarname('v2', who);
```

Následuje pojmenování souboru obrázků (v našem případě má soubor název Vzorek)

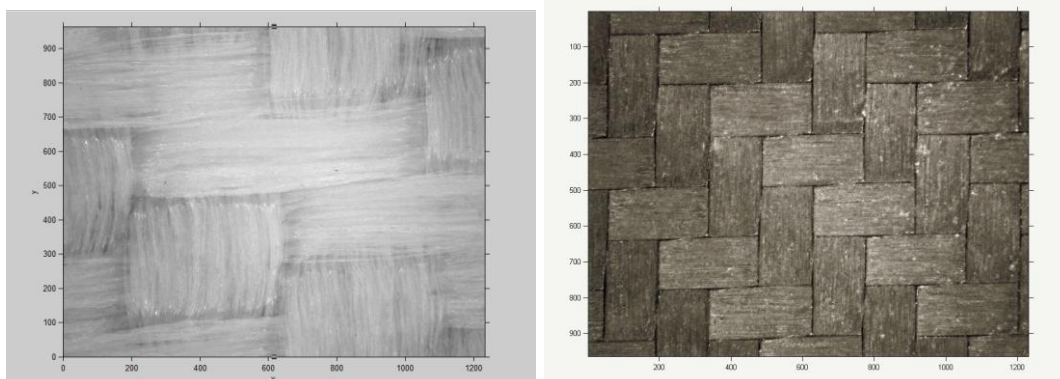
```
name = ['vzorek (' + num2str(i) + ').jpg'];
```

Nakonec se načtou obrázky do vytvořeného makra

```
eval([ v ' = imread(name); ']);
```

end

Takto zpracovaná data uložíme do m-souboru pomocí příkazu **save *nazev.mat*** a můžeme je přenést do programu COMSOL Multiphysics, který nám nadefinuje pracovní oblast.



a) b)

Obrázek č. 21. Zpracované obrázky v MATLABu a) výztuž v plátňové vazbě  
b) výztuž v keprové vazbě

COMSOL Multiphysics umožňuje modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) s následným řešením metodou konečných prvků. Program má k dispozici specializované moduly s definovanými parciálními diferenciálními rovnicemi a uživatelskými dialogy pro zadávání vlastností materiálů i okrajových podmínek. [30]



Dále provedeme zadání diferenciálních rovnic, které popisují náš problém (v našem případě je elektrické proudění v určitém směru), počáteční a okrajové podmínky, nastavíme další parametry modelu a model vyřešíme.

### 3.4.1. VÝPOČET TEORETICKÉ HODNOTY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KOMPOZITU

Pro výpočet teoretické elektrické vodivosti kompozitu pomocí modelování je nutno uvádět teoretické hodnoty vodivosti materiálů, ze kterých je kompozit vyroben. Matematická formulace problému je popsána rovnicí vedení elektrického náboje.

$$-\nabla d(\delta \nabla V - J^e) = dQ_j \quad (21)$$

Kde:  $\delta$  .....elektrická vodivost materiálů [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]

$Q_j$ .....zdroj proudu [A]

$J^e$ .....hustota proudu [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]

$d$  .....tloušťka vzorku [cm]

Vytvoření geometrie proběhne v několika krocích:

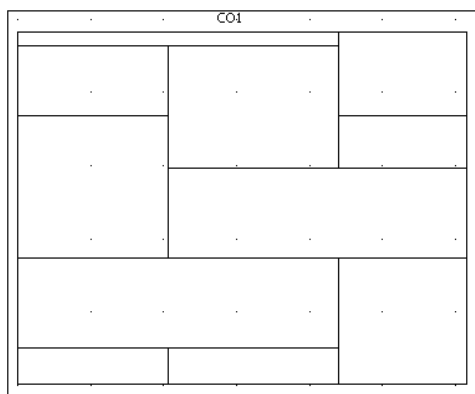
1. Založení 2D modelu. Model Navigátor => Space dimension a vybereme 2D geometrie
2. Vytvoření roviny ( $x=0$ ), která poslouží pro vytváření dalších 2D geometrických útvarů.
3. Z ikony *COMSOL Multiphysics* se nám objeví nabídka výběru fyzického režimu, v našem případě je to *Electromagnetics* => *Conductive Media DC*.
4. Vybereme si z panelu nástroje *Options* materiál, ze kterého byly vyrobeny měřicí vzorky kompozitu s uvedenými vlastnostmi (je to PP a E- glasses).
5. Vytvoření obdélníku vytažením čtverečku o zjištěné velikosti z obrázku zpracovaného v MATLABu (funkce *extrude*) –obrázek 22 a. Lze provést příkazem přes ikonu *Draw* => *Specify Objecte* => *Rectangle* =>Size a uvést rozměry v otevřeném okně. Pak příkazem *Union* sloučit všechny objekty do jediného.

6. Otevřeme okno menu *Options* a vybereme příkaz *Constants*. Do naběhnuté tabulky musíme uvést teoreticky zjištěné vlastnosti námi zkoušeného materiálu chápané programem jako hraniční podmínky (viz. tab. č. 12).

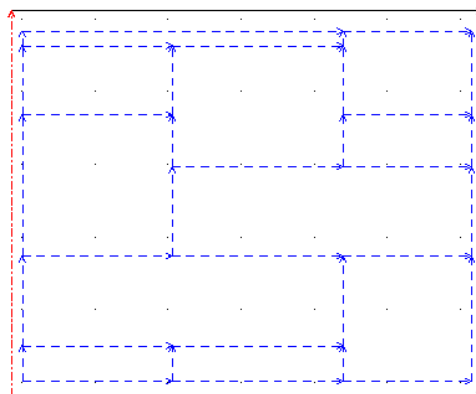
Tabulka č. 12. Teoretické konstanty vybraných vlastností skleněných vláken a PP

NAME	EXPRESSION PP	EXPRESSION E-sklo
C (měrné teplo)	170	1265
alpha (tepelná vodivost)	1.1e-4	4.6e-6
epsilon <sub>r</sub> (relativní permitivita)	$9 \cdot 10^{-3}$	$113 \cdot 10^{-8}$
epsilon (permitivita vakua)	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$8.85 \cdot 10^{-12}$
rho (hustota)	900	2540
sigma (elektrická vodivost)	1e-16	1e-11

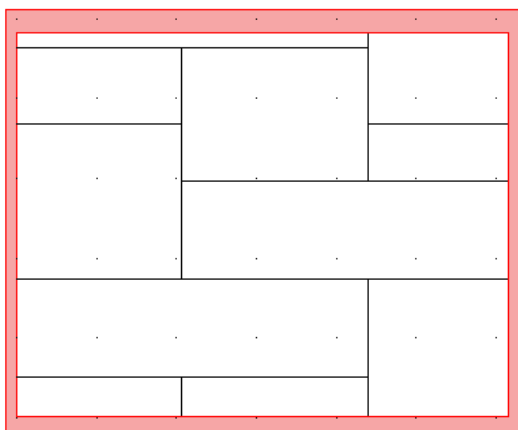
7. V menu Physics vybereme *Subdomain Settings* a v otevřeném okně z nabídky *Load* vybereme materiál, ze kterého máme vzorky pro každou vybranou oblast geometrického obrazu a uvedeme tloušťku vzorce 0.5 mm.
8. Vybereme z předložené ikony *Physics* => *Boundary setting* a zadáme, na které z os bude působit elektrický náboj s potenciálem 50 V (obrázek č. 22 b).
9. Příkazem *Initialize Mesh* z nabídky *Mesh* zakládáme síť konečných prvků. Po skončení bude generováno 5248 konečných prvků (obr. č. 22 d).
10. Vyřešení příkladu proběhne po příkazu z rolety *Solve* => *Solve problem*. Při tom musíme uvést parametry řešení, je to nabídka *Solver Parameters, Time dependent* kde na složce *General* uvádíme čas 0:10:3000. Pomocí příkazu *Solve* modelem kompozitu projde elektrický náboj (obrázek č. 22 e, f).
11. Přes příkazy *Postprocessing* => *Subdomain Integration* vybereme oblast pro výpočet elektrické vodivosti *electrical conductivity* (obrázek 22 c). Při kliknutí myši na *Add* dostaneme výsledek elektrické vodivosti vybrané oblasti. Pro náš případ je nutno vybrat celý model, čímž dostaneme elektrickou vodivost kompozitu.



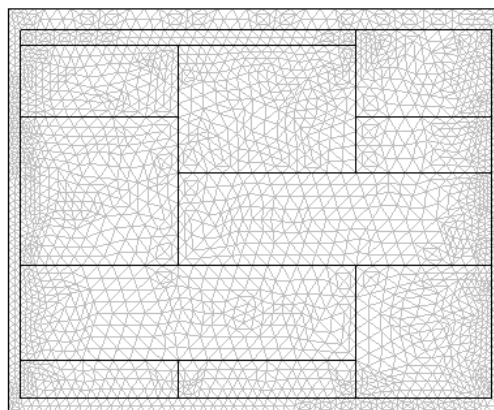
a)



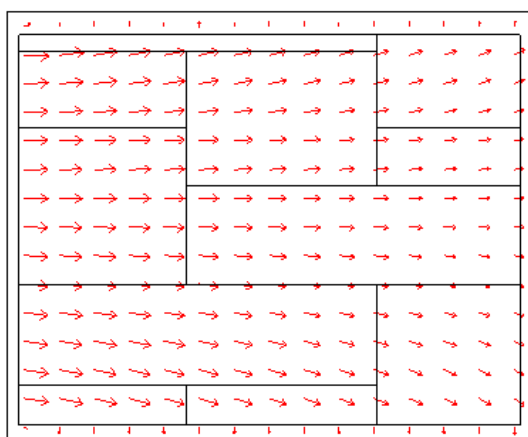
b)



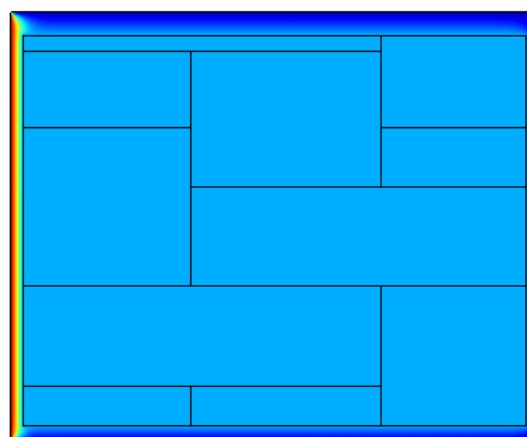
c)



d)



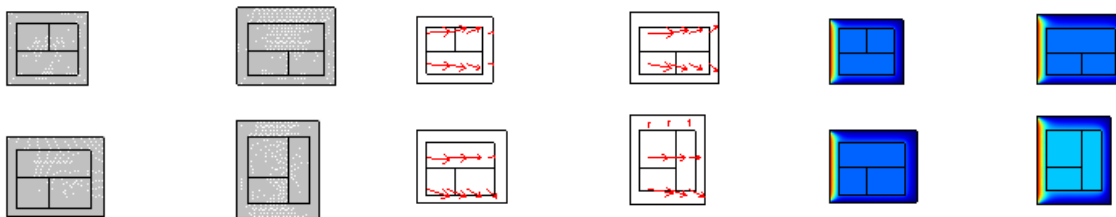
e)



f)

Obrázek č. 22. Jednotlivé kroky při vytvoření modelu geometrie

Pro přesnější zjištění elektrické vodivosti materiálu, ze kterého je vyrobený kompozit (v našem případě se jedná o E-sklo), je nutno zjistit elektrickou vodivost nejen pro celý vzorek, ale i pro jeho vazné buňky. Můžeme předpokládat, že pracovní oblast lze rozdělit do elementárních buněk, které nám umožní optimalizovat celý výpočet. Každá z těchto buněk je určena čtyřmi body, ve kterých se vzájemně kříží vždy dvě sousední příze osnovy a útku tkaniny (viz. obr. č. 23). Z výsledků vypočítáme průměrnou hodnotu, kterou považujeme za hodnotu elektrické vodivosti kompozitu.



Obrázek č. 23. Model vazných buněk kompozitu

Tak byl vytvořen nový algoritmus v MATLABu, který umožňuje výběr vazných buněk z vyfocených obrázků (viz. schéma č.2). Obrázky se ukládají automaticky do stávajícího m-souboru.

### Schéma č. 3.2. Postup ořezávání obrázku na vazné buňky.

```
list = who;
Ukazuje počet obrázků pro ořezání na vazné buňky a nový název pro něj
nvar = length(list) - 1;
for i = 1:nvar
    name = list(i);
Zadáme přesný počet kolik vazných buněk chceme vyřezat z obrázku
    for j = 1:10
        imshow(eval(cell2mat(name)));
        cname = genvarname([cell2mat(name) '_' num2str(j)], who);
        eval([ cname ' = imcrop; ']);
    end
end
```

Průměrné výsledky zjištěných hodnot pomocí simulací pro dva modely jsou uvedené v tabulce č. 13, v příloze č. 1 jsou uvedeny hodnoty všech padesáti modelů kompozitu elektrické vodivosti s plátňovou a keprovou tkanou výztuží.

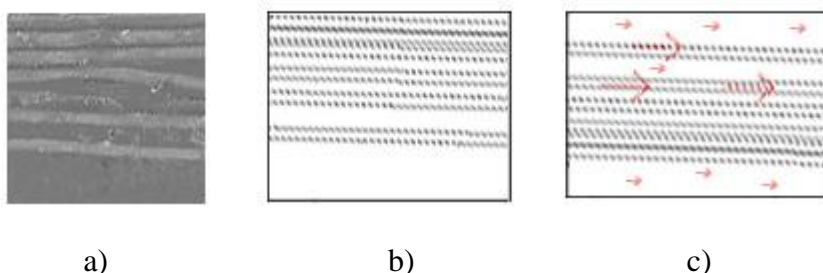
Tabulka č.13. Teoretická elektrická vodivost kompozitu E-sklo/PP při  $\delta$  E-skla  $1e-11[1/\Omega \cdot cm]$

	elektrická vodivost modelu kompozitu s plátňovou výztuží		elektrická vodivost modelu kompozitu s keprovou výztuží	
	celkového modelu	vazných buněk	celkového modelu	vazných buněk
1	1,187650E-11	1,089012E-13	1,187650E-11	4,900720E-14
2		5,530077E-14		6,400068E-14
3		1,200010E-13		8,100088E-14
4		1,100011E-13		5,600054E-14
5		1,320012E-13		9,900096E-14
6		8,000074E-14		1,000008E-13
7		1,620014E-13		6,400080E-14
8		1,430013E-13		1,000000E-13
9		1,320011E-13		5,680075E-14
10		1,332012E-13		9,000092E-14
Průměr	1,187650E-11	1,176411E-13	1,187650E-11	7,598135E-14
$\delta [1/\Omega \cdot cm]$	5,99707E-12		5,976240608E-12	

### 3.4.2. ZJIŠTĚNÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI SKLENĚNÝCH VLÁKEN POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE

Elektrická vodivost skleněných vláken je stanovena pomocí numerické simulace s využitím experimentálně naměřených elektrických vlastností kompozitních vzorků a čisté PP matrice. Pro tento účel byl využit geometrický model kompozitní mikrostruktury (kap. 3.3.2). Pro vytvoření daného modelu byly využity mikrofotografie skleněných vláken, které po zpracování v MATLABu lze exportovat do COMSOLu (obr.č. 24 a, b). V daném programu, při použití postupu popsaného v kapitole 3.4.1, nastavíme vhodnou elektrickou vodivost skleněných vláken (obr. č. 24 c).

Pro zjištění reálných hodnot elektrické vodivosti skleněných vláken pomocí numerické simulace je nutno nastavit elektrickou vodivost jednotlivých skleněných vláken tak, aby hodnoty elektrické vodivosti počítané pro celý kompozitní vzorek odpovídaly hodnotám zjištěným při experimentálním měření (tzv. kalibrace modelu).



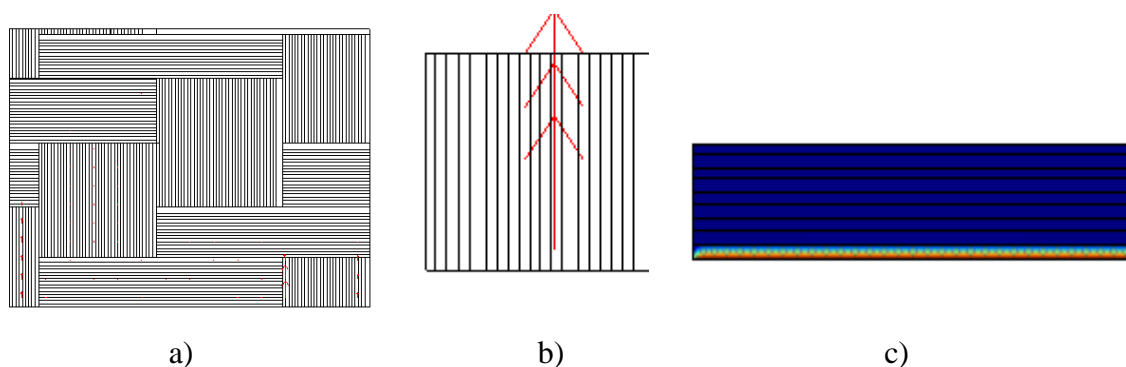
Obrázek č. 24 Geometrie skleněných vláken v PP matrici: a) mikrofotografie rozložení skleněných vláken, b) vytvořený model skleněných vláken, c) simulace elektrického pole v ose vláken

Tabulka č. 14. Elektrická vodivost skleněných vláken v PP matrici, [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]

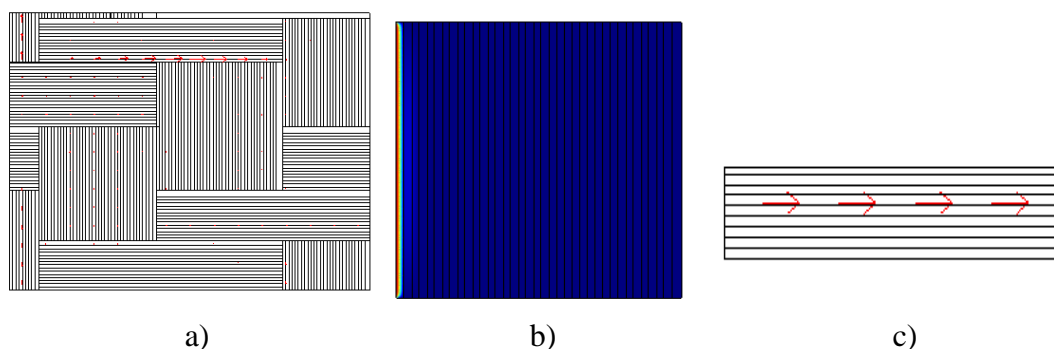
	elektrické napětí podél osy X		elektrický napětí podél osy Y	
	elektrická vodivost [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]		elektrická vodivost [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]	
	svazku vláken	jednotlivých vláken	svazku vláken	jednotlivých vláken
1	3,553387E-12	7,042936E-12	3,553387E-12	1,552131E-11
2		1,179756E-11		1,697159E-11
3		1,043978E-11		2,052528E-11
4		1,383418E-11		1,904558E-11
5		1,553141E-11		1,200068E-11
6		1,552131E-11		7,042936E-12
7		1,697159E-11		1,179756E-11
8		2,052528E-11		1,043978E-11
9		1,904558E-11		1,383418E-11
10		1,200068E-11		1,553141E-11
Průměr	3,553387E-12	1,427103E-11	3,553387E-12	1,427103E-11
E-sklo + PP (vypočteno ze simulace)	8,912209E-12		8,912209E-12	

### 3.4.3. VÝPOČET ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KOMPOZITU E-sklo/PP POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE

Pro výpočet elektrické vodivosti kompozitu na mezoúrovni pomocí numerické simulace byla počítána elektrická vodivost ve vazném bodě (obr. č. 25). Při působení elektřiny na tkaninu může elektrický náboj změnit svůj směr podle směru příze, což už bylo zjištěno při simulaci modelu vláken. Proto zvlášť vytváříme modely pro osnovu a útek (skupina obr.č. 26). Při uvedení do tabulek konstant v COMSOLu zjištěnou hodnotu elektrické vodivosti skleněných vláken pomocí simulace stanovíme simulačně elektrickou vodivost celkového modelu kompozitu. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce č. 15.



Obrázek č. 25 Rozložení elektrického pole ve vazné buňce podle směru příze při působení napětí podél osy Y, a) vazná buňka kompozitu, b) úsek podle osnovy, c) úsek podle útku.

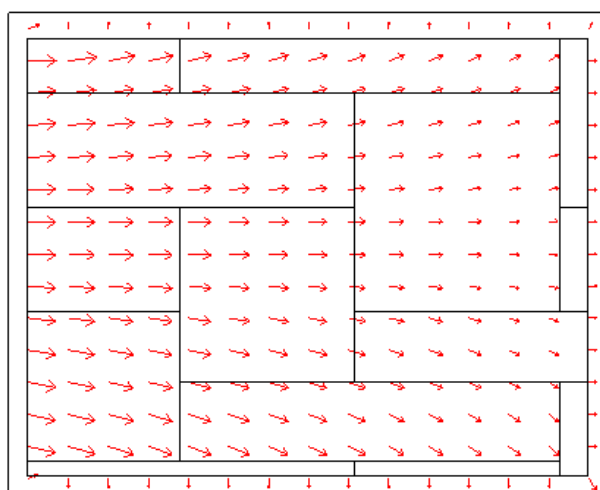


Obrázek č.26 Rozložení elektrického pole ve vazné buňce podle směru příze při působení napětí podél osy X, a) vazná buňka kompozitu, b) úsek podle osnovy, c) úsek podle útku.

Tabulka č. 15. Elektrická vodivost ve vazné buňce (plátno) při elektrické vodivosti  
 $E_{\text{skla}} 8,91 \cdot 10^{-12} [1/\Omega \cdot \text{cm}]$

	elektrické napětí podél osy X	elektrické napětí podél osy Y
	elektrická vodivost vazné buňky	elektrická vodivost vazné buňky
1	4,98547000E-12	7,63535400E-13
2	8,61987100E-13	8,49454300E-13
3	8,05887600E-13	6,34029300E-12
4	5,79976600E-12	6,68321600E-12
5	7,63535400E-13	7,99000700E-13
6	6,68321600E-12	8,63095300E-13
7	8,49454300E-13	8,61987100E-13
8	6,34029300E-12	5,79976600E-12
9	8,63095300E-13	4,98547000E-12
10	7,99000700E-13	8,05887600E-13
Průměr	2,87517054E-12	2,87517054E-12

Po provedení simulace dostáváme vypočtenou hodnotu elektrické vodivosti vazné buňky kompozitu PP/E-sklo, která se rovná  $2,875 \cdot 10^{-12} [1/\Omega \cdot \text{cm}]$ . Daný výsledek zadáváme do tabulky konstant v COMSOLu a používáme pro simulaci elektrických vlastností celého kompozitu s plátňovou tkanou výztuží, jehož model byl vytvořen už dříve.



Obrázek č. 27 Elektrické pole v plátňové vazné buňce stanovené pomocí numerické simulace, při elektrické vodivosti skleněných vláken  $8,91 \cdot 10^{-12} [1/\Omega \cdot \text{cm}]$

Hodnoty elektrické vodivosti modelu kompozitu s plátňovou tkanou výztuží byly statisticky zpracované a jsou uvedené v následující tabulce č. 16. Vstupní parametry pro skleněná vlákna byly nastaveny tak, aby výsledné hodnoty elektrických vodivostí

celého kompozitního vzorku odpovídali experimentálně naměřeným hodnotám (viz. příloha č. 2).

Tabulka č. 16. Statistické zpracování hodnot elektrické vodivosti modelu kompozitu s plátňovou tkanou výztuží pro teoreticky nastavené vstupní vodivosti E-skla ( $1e-11[1/\Omega \cdot \text{cm}]$ ) a pro hodnoty E-skla nastavené po kalibraci ( $8,91e-12[1/\Omega \cdot \text{cm}]$ )

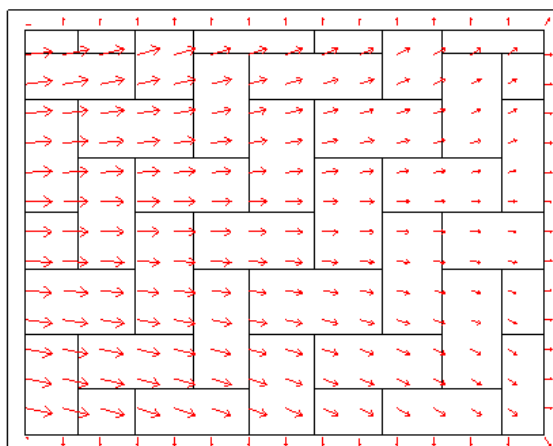
Elektrická vodivost modelu kompozitu při:		
	$\delta$ e-skla $1e-11$	$\delta$ e-skla $8,91e-12$
$\delta$ modelu kompozitu, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	6,0000407E-12	2,41254374E-13
IS spodní, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,97813358E-12	2,36022019E-13
IS horní, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	6,02194962E-12	2,46486730E-13
Rozptyl, $S^2$	5,94247903E-27	1,194835E-27
Směr. Odchylka, S	7,70874765E-14	3,456638E-14
Modus, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,9697695E-12	2,1912605E-13
Medián, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,9896800E-12	2,3368025E-13
Variační koeficient, [%]	3,79	1,73

Výsledné hodnoty elektrické vodivosti kompozitu s keprovou tkanou výztuží jsou uvedeny v následující tabulce č. 17.

Tabulka č. 17. Statistické zpracování hodnot elektrické vodivosti modelu kompozitu s keprovou tkanou výztuží pro teoreticky nastavené vstupní vodivosti E-skla ( $1e-11[1/\Omega \cdot \text{cm}]$ ) a pro hodnoty E-skla nastavené po kalibraci ( $8,91e-12[1/\Omega \cdot \text{cm}]$ )

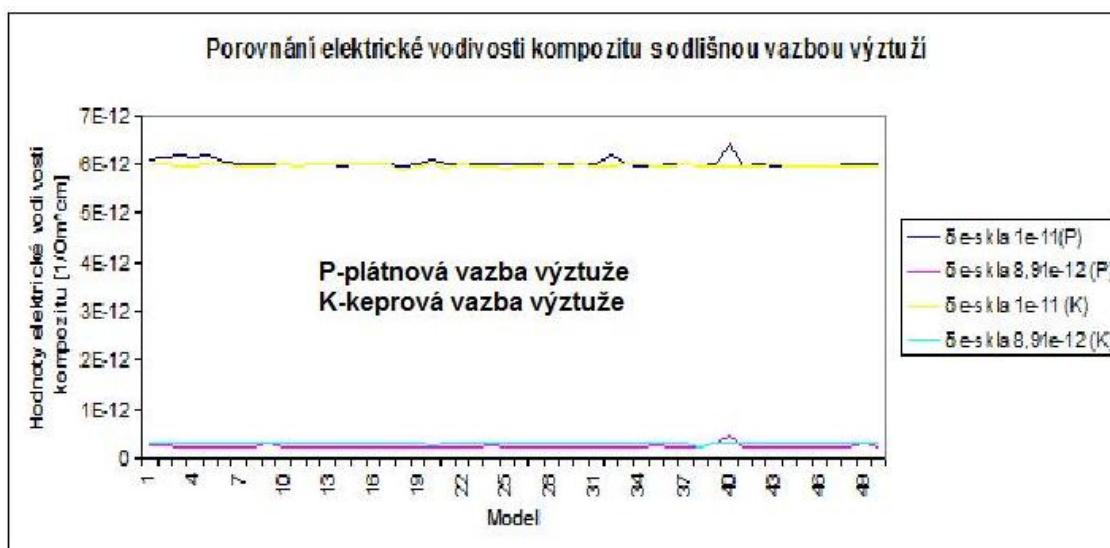
Elektrická vodivost modelu kompozitu při:		
	$\delta$ e-skla $1e-11$	$\delta$ e-skla $8,91e-12$
$\delta$ modelu kompozitu, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,9760886E-12	2,912385E-13
IS spodní, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,969238E-12	2,887542E-13
IS horní, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,982939E-12	2,937229E-13
Rozptyl, $S^2$	5,810556E-28	7,641679E-29
Směr. Odchylka, S	2,410509E-14	8,741670E-15
Modus, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,991856E-12	2,923784E-13
Medián, $[1/\Omega \cdot \text{cm}]$	5,94082E-12	2,93542E-13
Variační koeficient, [%]	1,205	0,437



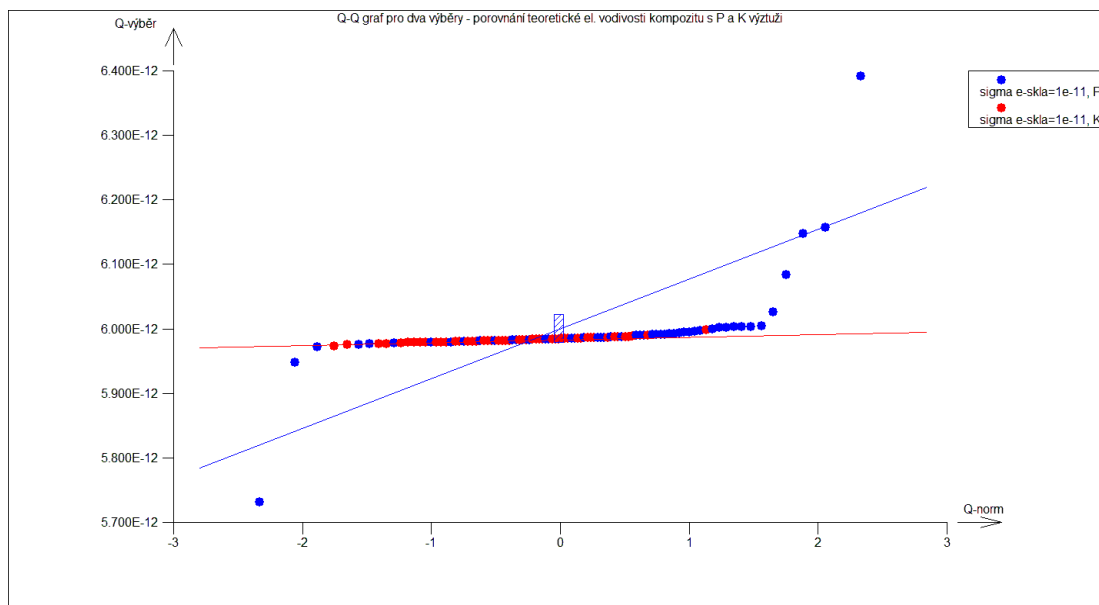


Obrázek č. 28 Elektrické pole v kompozitním modelu s keprovou výztuží stanovené pomocí numerické simulace s vodivostí skleněných vláken nastavenou na  $8,91e-12 [1/\Omega \cdot cm]$

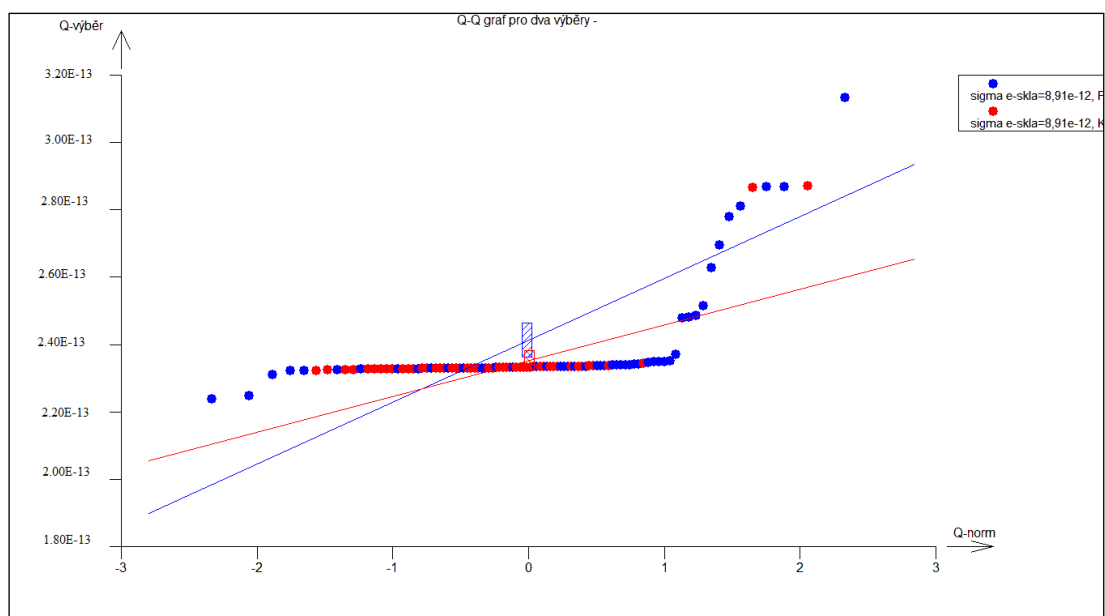
Na obrázku č. 29 je znázorněno porovnání elektrické vodivosti kompozitu s plátňovou (P) a keprovou (K) tkanou výztuží. Podle daného grafu lze říct, že elektrická vodivost stejných materiálů se skoro nemění se změnou vazby vláknenné výztuže. Při porovnání výsledků modelu pro kompozit s plátňovou a keprovou výztuží pomocí QQ grafu, kdy byly při výpočtu použity různé vstupní hodnoty elektrických vodivostí skleněných vláken, se tento předpoklad potvrdil.



Obrázek č. 29 Porovnání simulací elektrické vodivosti kompozitu E-sko/PP s keprovou a plátňovou tkanou výztuží



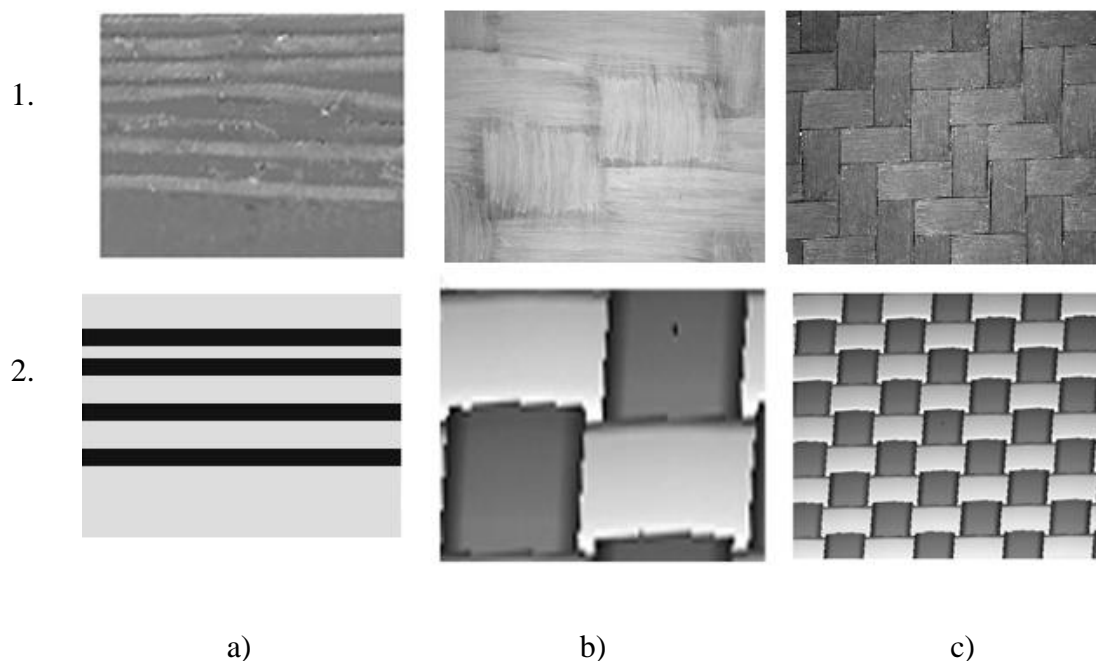
Obrázek č. 30 Porovnání elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP s plátňovou a keprovou tkanou výztuží při  $\delta$  e-skla  $1e-11$  [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]



Obrázek č.31 Porovnání simulační elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP s plátňovou a keprovou tkanou výztuží při  $\delta$  e-skla  $8,91e-12$  [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]

## 4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Geometrické modely struktury studovaného kompozitu, které byly použity pro numerické simulace, jsou vytvořeny tak, aby co nejlépe vystihly strukturu reálných kompozitních vzorku, viz obr. 32.



Obrázek č. 32 Vícestupňový model kompozitní struktury: 1. Reálná struktura, 2. Geometrický model  
a) vlákna+matrice, b) vazná buňka, c) povrch kompozitního vzorku

Pravděpodobná elektrická vodivost skleněných vláken je pak stanovena jako průměr hodnot, které je třeba nastavit jako materiálový parametr pro vlákna na mikroúrovni (první krok výpočtu ve vícestupňovém modelu), aby efektivní hodnota elektrické vodivosti pro kompozitní vzorek (makro-úroveň) odpovídala experimentálně naměřeným hodnotám elektrické vodivosti pro reálné kompozitní vzorky. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot je v tabulce 18.

Tabulka č. 18 Výsledné počítané a měřené hodnoty elektrické vodivosti studovaných kompozitních vzorků s plátovou a keprovou výztuží sklo/PP. Tyto hodnoty jsou stanoveny pro teploty 25°C.

Elektrické vlastnosti	Počítané		Měřené	
	Plátno	Kepr	Plátno	Kepr
Elektrická vodivost [S.m-1]	2,4e-13	2,9e-13	2,1e-13	2,7e-13
Měrný elektrický odpor [Ω.m]	4,2e12	3,5e12	4,8e12	3,7e12

Získanou hodnotu elektrické vodivosti použitých skleněných vláken  $8,91 \cdot 10^{-12} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  jsme převedli na měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] a porovnali s hodnotami, které jsou pro daný typ skleněných vláken uváděny v dostupných materiálech, viz tab. 19.

*Tabulka č. 19 Porovnání měrných elektrických odporů skleněných vláken*

Elektrické vlastnosti	Vypočtené	Z literatury [1]
Měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	1,12e11	1,2e11

Rozdíl mezi oběma parametry je menší než 7%, takže můžeme konstatovat, že výsledky získané při úpravě vstupních parametrů vykazují dobrou shodu s parametry, které jsou pro dané materiály obvyklé.

Můžeme tedy říci, že navržená metodika dává věrohodné výsledky elektrických vlastností vláken a mohla by být využita pro stanovení dalších obtížně měřitelných vlastností jednotlivých vláken.

## 5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření metodiky pro věrohodné stanovení transportních vlastností anorganických vláken kombinací numerických simulací a experimentálních měření transportních vlastností kompozitních materiálů s vláknennou výztuží. Rešeršní část seznamuje s aktuálním stavem této problematiky, s problematikou měření transportních vlastností vláknenných materiálů a s fyzikální podstatou transportních vlastností.

V experimentální části pak na základě důkladné analýzy strukturních mikrofotografií byl vytvořen vícestupňový geometrický model kompozitní struktury s vláknennou výztuží (polypropylén vyztužený skleněnými vlákny). U těchto kompozitu byly naměřeny hodnoty elektrické vodivosti a stanoveny materiálové vlastnosti, dále byly tyto parametry stanoveny u čisté polypropylénové desky.

V navrženém numerickém modelu pak byly kalibrovány hodnoty elektrické vodivosti skleněných vláken tak, aby byla nalezena shoda mezi počítanými a měřenými hodnotami elektrických vodivostí u kompozitní desky. Tímto postupem byl stanoven nejvhodnější parametr elektrických vodivostí skleněných vláken. Tento parametr byl porovnán s hodnotami uváděnými pro daný typ skleněných vláken v dostupné literatuře. Byla prokázána dobrá shoda mezi těmito hodnotami, což prokázalo věrohodnost vytvořeného modelu.

Tento model může být dále využit pro stanovení dalších obtížně měřitelných vlastností anorganických vláken. Tyto vlastnosti jsou měřitelné pro rozměrné kompozitní vzorky a při použití termoplastické matrice jsou struktura a vlastnosti nevyztuženého termoplastu a termoplastu v kompozitu shodné, proto můžeme vlastnosti samotné matrice experimentálně naměřit.

Věrohodné stanovení vlastností kompozitních složek je nezbytné pro spolehlivou predikci struktury a vlastností složitých kompozitních materiálů, které jsou nezbytné pro přípravu velmi individuálních materiálů šitých namíru přesně pro dané účely. Finální výrobek musí být přesně přizpůsobený předem zadaným požadavkům. Výběr vhodných materiálů složek, spolu se správným tvarováním a dimenzováním součástí a konstrukce umožňuje vytvořit kompozitní díly s širokým spektrem mechanických, fyzikálních a ostatních výsledných vlastností. Rozvoj těchto přístupů je v dnešní době nezbytnou součástí rozvoje moderních metod materiálového inženýrství.

## 6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Composite Materials Series: Fiber Reinforcement for Composite Materials, edited by A.R. Bunsell, Elsevier, Amsterdam, 1988, ISBN: 0-444-42801-1.
- [2] Bird, R.B at al.: Transport Phenomena, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2002.
- [3] Feynman,R.P, Leighton,R.B., Sands,M.: The Feynman Lectures on Physics 1-3, FRAGMENT, Havlíčkův Brod, 2000-2002, (in Czech)
- [4] Tomková, B.: Contribution to Multiscale Modeling of Textile Reinforced Composites, Proc. of TEXCOMP9, Recent Advances in Textile Composites, DEStech Publications, Inc., Lancaster, USA, 2008, s. 151-159.
- [5] Hejne, M.: Fibers. 5. Synthetic Inorganic, Institut für Chemische Technik der Universität Karosuje, 2005
- [6] Srtová, H.: Skleněná vlákna, TUL, Liberec, 2005
- [7] Vypočítání elektrické vodivosti vláken, dostupné z [www.Fyzika-jreichl.com](http://www.Fyzika-jreichl.com) [citováno 16.11.2008]
- [8] Výroba, složení a vlastnosti anorganických vláken, dostupné z [www.himik.ru/encyklopedia](http://www.himik.ru/encyklopedia) [citováno 23.11.2008].
- [9] Struktura, vlastnosti, způsoby výroby čedičových a skleněných vláken, dostupné z [www.tech.ru/content/kompozit/bazaltovye-volokna](http://www.tech.ru/content/kompozit/bazaltovye-volokna) [citováno 29.10.2008]
- [10] Výroba a struktura keramických vláken, dostupné z [www.basl.safework.ru](http://www.basl.safework.ru) [citováno 6.12.2008]
- [11] Vlastnosti uhlíkových vláken, [citováno 16.11.2008], dostupné z [www.sgra.com.http://manufakturing.fabrication.globalspec.com/industrial](http://www.sgra.com.http://manufakturing.fabrication.globalspec.com/industrial)
- [12] Vlastnosti keramických vláken, dostupné z [www.promatpraha.cz](http://www.promatpraha.cz) [citováno 26.12.2008]
- [13] Složení a způsoby výroby uhlíkových vláken, dostupné z [www.geocities.com/vpkelly.geo](http://www.geocities.com/vpkelly.geo) [citováno 12.10.2008]
- [14] Vlastnosti skleněných vláken, dostupné z [www.glas.compnet.ru/quarz.htm](http://www.glas.compnet.ru/quarz.htm) [citováno 27.11.2008].
- [15] Vlastnosti a použití keramických vláken, dostupné z [www.comfort-house.ru](http://www.comfort-house.ru) [citováno 11.12.2008]
- [16] Použití anorganických vláken, dostupné z [www.prom-line.com/filt008.htm](http://www.prom-line.com/filt008.htm) [citováno 28.11.2008]

- [17] Použití anorganických vláken v průmyslu, dostupné z [www.proxima.com.ua](http://www.proxima.com.ua)  
[citováno 23.12.2008]
- [18] Metoda vypočítání koeficientu tepelné vodivosti, dostupné z  
<http://www.rosteplo.ru> [citováno 19.02.2009]
- [19] Metoda měření tepelné vodivosti, dostupné z <http://repairparts.ru>  
[citováno 13.02.2009]
- [20] Košek, M., Košková, B.: Struktura a vlastnosti vláken, TUL, Liberec, 1991
- [21] Kolektiv autorů: Textilie v novém tisíciletí II, TUL, Liberec, 2001
- [22] Chaloupka, J.: Využití obrazové analýzy při zkoumání zakrytí tkanin, DP, Liberec, 1998
- [23] Lucia G, manuál
- [24] Tomková, B.: Struktura uhlíkového kabílku v kompozitu C/C a její vliv na výslednou tepelnou vodivost kabílku, PPZ, TUL, Liberec, 2005
- [25] Vlastnosti kompozitu, dostupné z <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf> od 6.09.2008, [citováno 21.03.2009]
- [26] Kolísko, J.: Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů, ČVUT, Praha, 2007.
- [27] Tomková, B.: Kompozity s textilní výztuží, TUL, 2005.
- [28] Vznik a vlastnosti elektrického pole, izolantu, dostupné z  
<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=228> [citováno 19.03.2009]
- [29] Výpočet elektrické vodivosti izolantu, dostupné z  
<http://www.proelectro.ru/lib/kabel/7.html> [citováno 5.03.2009]
- [30] Práce s COMSOLem, vytvoření geometrického modelu, dostupné z  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/comsol-multiphysics-nove-jmeno-profemlab>  
[citováno 1.06.2008, Karel Bittner]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1	Schéma výroby skleněných vláken
Obrázek č. 2	Skleněná vlákna
Obrázek č. 3	Čedičová vlákna
Obrázek č. 4	Stroje pro výrobu čedičových vláken z pece malých rozměrů ovládaná automatickými podávači čedičových kuliček
Obrázek č. 5	Uhlíkové nanotrubičky
Obrázek č. 6	Postup výroby uhlíkového vlákna a příslušné změny struktury
Obrázek č. 7	Mikrostruktura uhlíkových vláken
Obrázek č. 8	Surovina pro keramická vlákna
Obrázek č. 9	Výroba keramických vláken
Obrázek č. 10	Závislost vodivosti na teplotě a objemové hmotnosti
Obrázek č. 11	Přístroj USK-U
Obrázek č. 12	Vybíjení textilie
Obrázek č. 13	Nabíjení textilie
Obrázek č. 14	Cyklus nabíjení a vybíjení textilie
Obrázek č. 15	Dlaždice pro tepelnou izolaci
Obrázek č. 16	Filtr
Obrázek č. 17	Mřížka izolantu v elektrickém poli.
Obrázek č. 18	PP vlákno a granulovaný polypropylen
Obrázek č. 19	Třístupňový geometrický model studované struktury: a) mikroúroveň, 1 - vlákna, 2 - matrice, b) mezoúroveň, vazná buňka ve tkanině, c) kompozitní destička
Obrázek č. 20	Plošné zakrytí kompozitu E-sklo/PP, a) v keprové vazbě, b) v plátnové vazbě
Obrázek č. 21	Zpracované obrázky v MATLABu, a) výztuž v plátnové vazbě, b) výztuž v keprové vazbě
Obrázek č. 22	Jednotlivé kroky při vytvoření modelu geometrie
Obrázek č. 23	Model vazných buněk kompozitu
Obrázek č. 24	Geometrie skleněných vláken v PP matrici: a) mikrofotografie rozložení skleněných vláken, b) vytvořený model skleněných vláken, c) simulace elektrického pole v ose vláken



- Obrázek č. 25 Rozložení elektrického pole ve vazné buňce podle směru příze při působení napětí podél osy Y ,a) vazná buňka kompozitu, b) úsek podle osnovy, c)úsek podle útku.
- Obrázek č. 26 Rozložení elektrického pole ve vazné buňce podle směru příze při působení napětí podél osy X, a) vazná buňka kompozitu, b)úsek podle osnovy, c) úsek podle útku.
- Obrázek č. 27 Elektrické pole v plátňové vazné buňce stanovené pomocí numerické simulace,při elektrické vodivosti skleněných vláken  $8,91e-12 [1/\Omega \cdot \text{cm}]$ .
- Obrázek č. 28 Elektrické pole v kompozitním modelu s keprovou výztuží stanovené pomocí numerické simulace s vodivostí skleněných vláken nastavenou na  $8,91e-12[1/\Omega \cdot \text{cm}]$
- Obrázek č. 29 Porovnání simulací elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP s keprovou a plátňovou tkanou výztuží
- Obrázek č. 30 Porovnání elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP s plátňovou a keprovou tkanou výztuží při  $\delta \text{ e-skla } 1e-11 [1/\Omega \cdot \text{cm}]$
- Obrázek č. 31 Porovnání simulační elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP s plátňovou a keprovou tkanou výztuží při  $\delta \text{ e-skla } 8,91e-12 [1/\Omega \cdot \text{cm}]$
- Obrázek č. 32 Vícetupňový model kompozitní struktury: 1. Reálná struktura, 2. Geometrický model - a) vlákna+matrice, b) vazná buňka, c) povrch kompozitního vzorku

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1	Složení skleněných a čedičových vláken
Tabulka č. 2	Složení keramických vláken
Tabulka č. 3	Vybrané vlastnosti skleněných vláken
Tabulka č. 4	Vlastnosti čedičových vláken
Tabulka č. 5	Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken
Tabulka č. 6	Vlastnosti uhlíkových vláken na bázi PAN
Tabulka č. 7	Vlastnosti keramických vláken
Tabulka č. 8	Vybraní vlastnosti různých vláken
Tabulka č. 9	Tepelná odolnost anorganických vláken a teploty měknutí
Tabulka č. 10	Tepelné vodivosti různých materiálů
Tabulka č. 11	Vybrané vlastnosti skleněných a čedičových vláken
Tabulka č. 12	Teoretické konstanty vybraných vlastností skleněných vláken a PP
Tabulka č. 13	Teoretická elektrická vodivost kompozitu E-sklo/PP při $\delta$ E-skla $1e-11$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]
Tabulka č. 14	Elektrická vodivost skleněných vláken v PP matrici, [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]
Tabulka č. 15	Elektrická vodivost ve vazné buňce (plátno) při elektrické vodivosti E-skla $8,91 \cdot 10^{-12}$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]
Tabulka č. 16	Statistické zpracování hodnot elektrické vodivosti modelu kompozitu s plátňovou tkanou výztuží pro teoreticky nastavené vstupní vodivosti E-skla ( $1e-11$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]) a pro hodnoty E-skla nastavené po kalibraci ( $8,91e-12$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ])
Tabulka č. 18	Statistické zpracování hodnot elektrické vodivosti modelu kompozitu s keprovou tkanou výztuží pro teoreticky nastavené vstupní vodivosti E-skla ( $1e-11$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]) a pro hodnoty E-skla nastavené po kalibraci ( $8,91e-12$ [ $1/\Omega \cdot \text{cm}$ ]),
Tabulka č. 19	Výsledné počítané a měřené hodnoty elektrické vodivosti studovaných kompozitních vzorků s plátňovou a keprovou výztuží sklo/PP. Tyto hodnoty jsou stanoveny pro teploty $25^\circ\text{C}$ .
Tabulka č. 20	Porovnání měrných elektrických odporů skleněných vláken

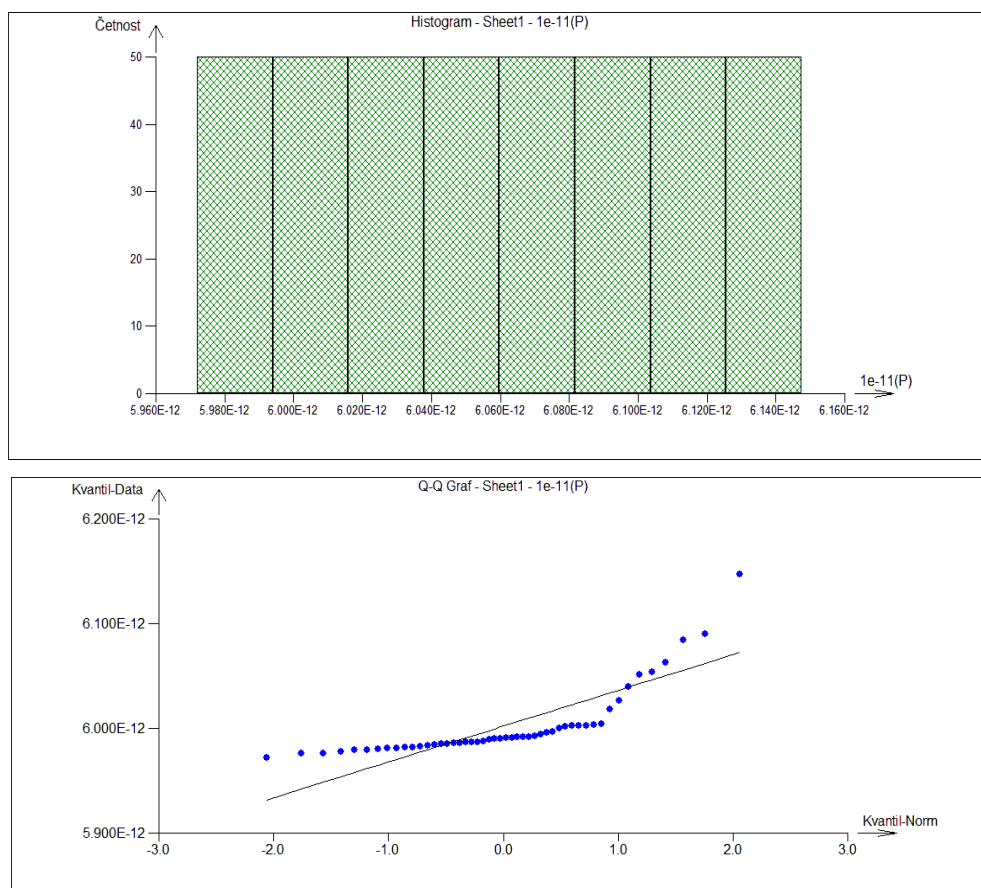
## **PŘÍLOHÁ č. 1**

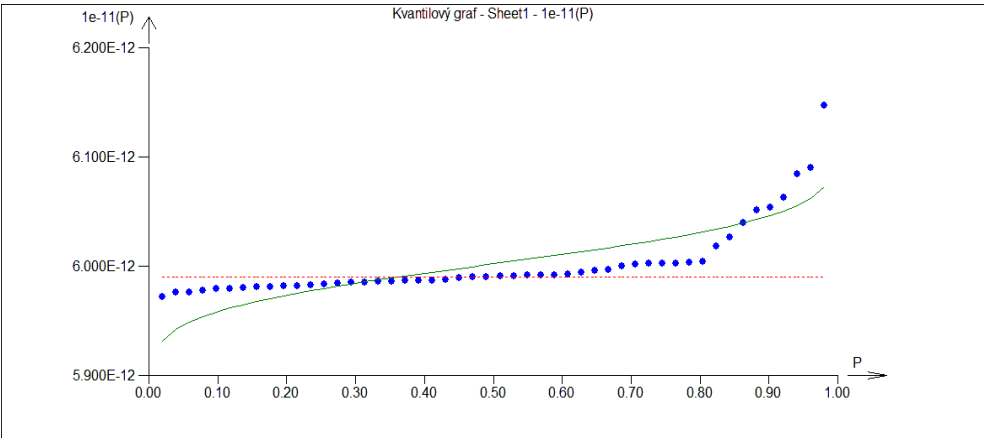
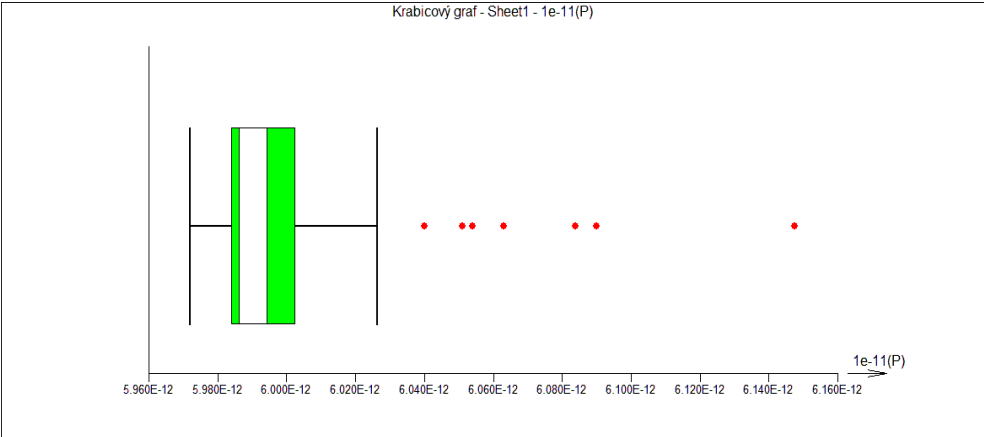
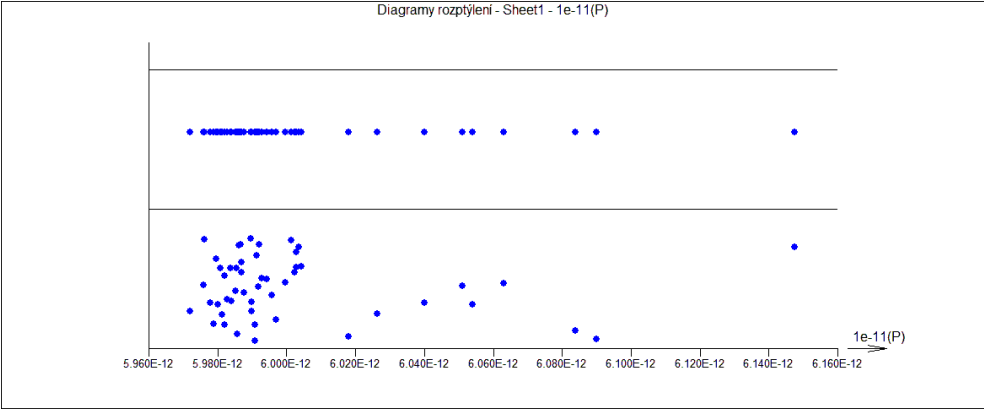
**Teoretická elektrická vodivost kompozitu E-sklo/PP s plátnovou  
tkanou výztuží při  $\delta$  E-skla  $1e-11[1/\Omega \cdot \text{cm}]$**

model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu		model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu	
	kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>		kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>
1	1,207892E-11	8,900009E-14	21	1,187650E-11	1,05201E-13
	6,08396E-12			5,990851E-12	
2	1,207894E-11	2,170025E-13	22	1,18765E-11	1,26201E-13
	6,147971E-12			6,00135E-12	
3	1,207894E-11	2,229017E-13	23	1,18765E-11	1,12281E-13
	6,15092E-12			5,99439E-12	
4	1,207893E-11	2,160021E-13	24	1,187648E-11	1,09357E-13
	6,14747E-12			5,992919E-12	
5	1,207893E-11	2,349015E-13	25	1,18765E-11	1,32151E-13
	6,156916E-12			6,00433E-12	
6	1,187650E-11	1,760016E-13	26	1,18765E-11	1,29101E-13
	6,026251E-12			6,002801E-12	
7	1,187650E-11	1,29001E-13	27	1,187648E-11	1,22741E-13
	6,00275E-12			5,999611E-12	
8	1,187650E-11	1,07401E-13	28	1,18765E-11	1,30661E-13
	5,991951E-12			6,00358E-12	
9	1,187650E-11	9,140102E-14	29	1,187649E-11	1,06201E-13
	5,983951E-12			5,991346E-12	
10	1,187650E-11	9,7401E-14	30	1,187650E-11	1,14741E-13
	5,98695E-12			5,995621E-12	
11	1,187649E-11	8,7801E-14	31	1,187649E-11	9,67008E-14
	5,98215E-12			5,98660E-12	
12	1,187650E-11	1,026011E-13	32	1,187649E-11	1,06261E-13
	5,989551E-12			5,991375E-12	
13	1,187650E-11	1,050010E-13	33	1,187650E-11	1,28401E-13
	5,99075E-12			6,002451E-12	
14	1,18765E-11	8,900009E-14	34	1,187649E-11	7,90609E-14
	5,982750E-12			5,97778E-12	
15	1,187650E-11	1,03002E-13	35	1,187650E-11	7,57009E-14
	5,989751E-12			5,976100E-12	
16	1,187649E-11	1,03001E-13	36	1,187650E-11	1,02711E-13
	5,98975E-12			5,989606E-12	
17	1,18765E-11	9,7161E-14	37	1,187650E-11	9,6021E-14
	5,98683E-12			5,98626E-12	
18	1,187650E-11	8,62009E-14	38	1,187650E-11	8,75909E-14
	5,981350E-12			5,982045E-12	
19	1,18765E-11	9,1191E-14	39	1,187650E-11	9,4081E-14
	5,98385E-12			5,985290E-12	
20	1,18765E-11	1,13201E-13	40	1,269717E-11	8,65909E-14
	5,99485E-12			6,39188E-12	

model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu		model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu	
	kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>		kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>
41	1,187650E-11	8,51909E-14	46	1,18765E-11	8,25009E-14
	5,980845E-12			5,97950E-12	
42	1,187650E-11	9,8881E-14	47	1,187650E-11	8,3651E-14
	5,987691E-12			5,980075E-12	
43	1,187650E-11	7,55209E-14	48	1,187650E-11	9,4401E-14
	5,97601E-12			5,985451E-12	
44	1,187650E-11	8,14209E-14	49	1,187650E-11	1,17641E-13
	5,978960E-12			5,99707E-12	
45	1,187650E-11	6,74808E-14	50	1,187650E-11	1,07011E-13
	5,971990E-12			5,991756E-12	

\*1 – střední hodnota elektrické vodivosti 10 vazných buněk jednoho modelu kompozitu



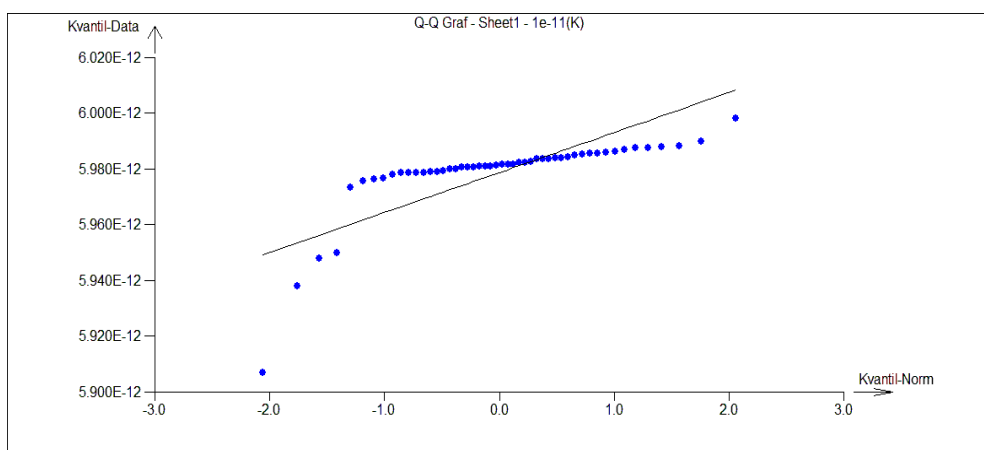
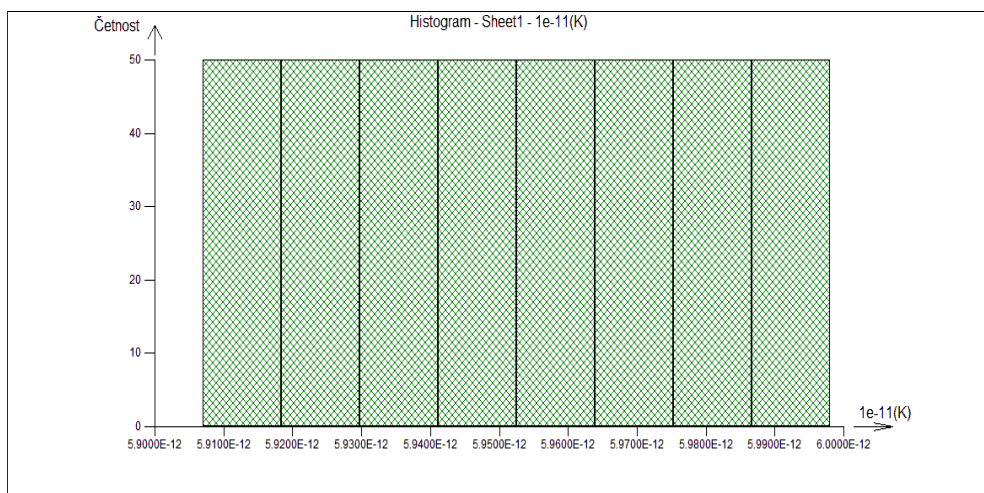


**Teoretická elektrická vodivost kompozitu E-sklo/PP s keprovou  
tkanou výztuží při  $\delta$  E-skla  $1e-11[1/\Omega \cdot \text{cm}]$**

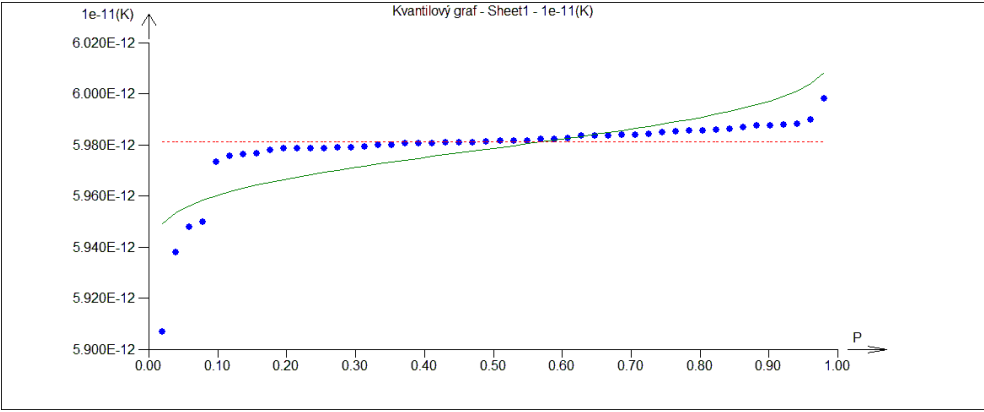
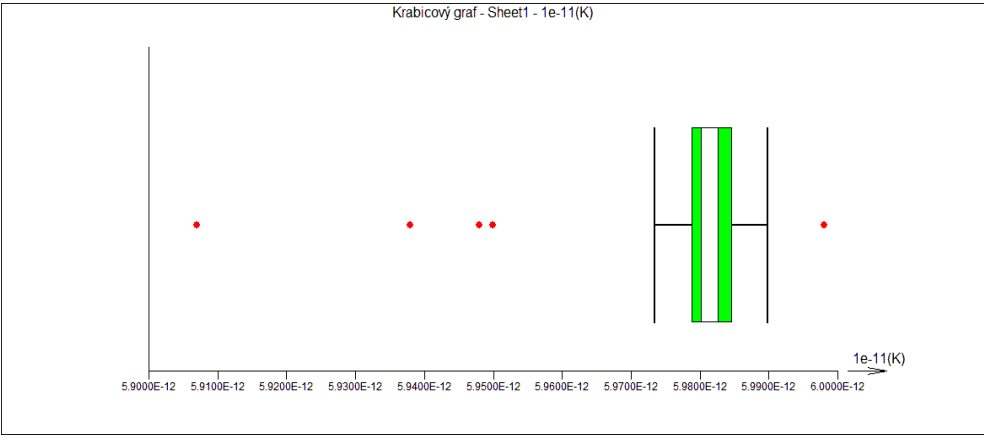
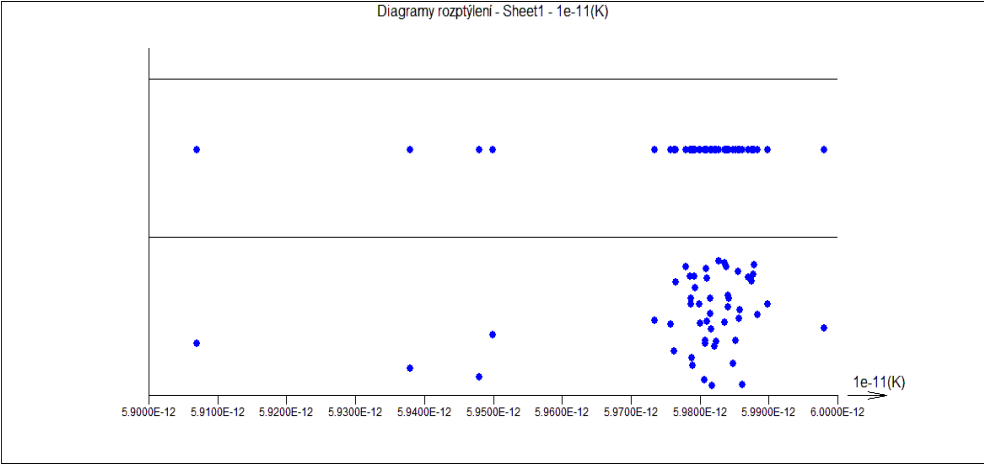
model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu		model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu	
	kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>		kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>
1	1,187650E-11	1,1970100E-13	21	1,187650E-11	9,0720870E-14
průměr	5,9981005E-12		průměr	5,9836104E-12	
2	1,187650E-11	9,1100910E-14	22	1,187650E-11	9,4580910E-14
průměr	5,9838005E-12		průměr	5,9855405E-12	
3	1,187650E-11	7,5980800E-14	23	1,187650E-11	8,1840860E-14
průměr	5,9762404E-12		průměr	5,9791704E-12	
4	1,187649E-11	8,3600760E-14	24	1,187650E-11	8,3440860E-14
průměr	5,98004538E-12		průměr	5,9799704E-12	
5	1,187650E-11	9,1730880E-14	25	1,187650E-11	9,5630910E-14
průměr	5,9841154E-12		průměr	5,9860655E-12	
6	1,187650E-11	9,7630900E-14	26	1,187650E-11	8,6780870E-14
průměr	5,9870655E-12		průměr	5,9816404E-12	
7	1,187649E-11	8,1040830E-14	27	1,187650E-11	8,5410910E-14
průměr	5,9787654E-12		průměr	5,9809555E-12	
8	1,187649E-11	8,5450900E-14	28	1,187650E-11	9,8550890E-14
průměr	5,9809705E-12		průměr	5,9875254E-12	
9	1,187650E-11	8,0960840E-14	29	1,187650E-11	8,5090850E-14
průměr	5,9787304E-12		průměr	5,9807954E-12	
10	1,187649E-11	9,8990980E-14	30	1,187650E-11	9,0800920E-14
průměr	5,9877405E-12		průměr	5,9836505E-12	
11	1,187650E-11	8,6490850E-14	31	1,187650E-11	8,0700870E-14
průměr	5,9814954E-12		průměr	5,9786004E-12	
12	1,187650E-11	1,0033090E-13	32	1,187650E-11	9,7170980E-14
průměr	5,9884155E-12		průměr	5,9868355E-12	
13	1,187650E-11	9,0790860E-14	33	1,187650E-11	9,4760940E-14
průměr	5,9836454E-12		průměr	5,9856305E-12	
14	1,187650E-11	9,9370890E-14	34	1,187650E-11	9,3920900E-14
průměr	5,9879354E-12		průměr	5,9852105E-12	
15	1,187650E-11	9,1740910E-14	35	1,187650E-11	8,0880890E-14
průměr	5,9841205E-12		průměr	5,9786904E-12	
16	1,187650E-11	9,1960850E-14	36	1,187650E-11	8,8880880E-14
průměr	5,9842304E-12		průměr	5,9826904E-12	
17	1,187650E-11	1,0320090E-13	37	1,187650E-11	9,3190970E-14
průměr	5,9898505E-12		průměr	5,9848455E-12	
18	1,187650E-11	9,2690890E-14	38	1,187650E-11	8,7850290E-14
průměr	5,9845954E-12		průměr	5,9821751E-12	
19	1,187650E-11	7,9460860E-14	39	1,187650E-11	8,5560900E-14
průměr	5,9779804E-12		průměr	5,9810305E-12	
20	1,187650E-11	9,5860910E-14	40	1,187650E-11	8,5150890E-14
průměr	5,9861805E-12		průměr	5,9808254E-12	

model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu		model kompozitu	teoretická elektrická vodivost modelu	
	kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>		kompozitu	vazných buněk <sup>1</sup>
41	1,187650E-11	8,7040970E-14	46	1,187650E-11	8,2010880E-14
průměr	5,9817705E-12		průměr	5,9792554E-12	
42	1,187650E-11	8,8340880E-14	47	1,187650E-11	8,4770900E-14
průměr	5,9824204E-12		průměr	5,9806355E-12	
43	1,187650E-11	9,5170930E-14	48	1,187650E-11	8,6450930E-14
průměr	5,9858355E-12		průměr	5,9814755E-12	
44	1,187650E-11	8,1440870E-14	49	1,187650E-11	7,6600840E-14
průměr	5,9789704E-12		průměr	5,9765504E-12	
45	1,187650E-11	7,0310840E-14	50	1,187650E-11	7,4970840E-14
průměr	5,9734054E-12		průměr	5,9757354E-12	

\*1 – střední hodnota elektrické vodivosti 10 vazných buněk jednoho modelu kompozitu







## **PŘÍLOHÁ č. 2**

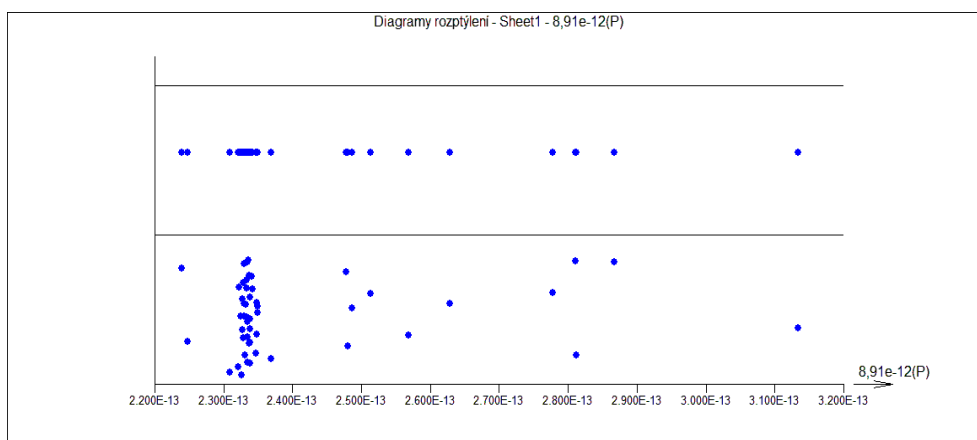
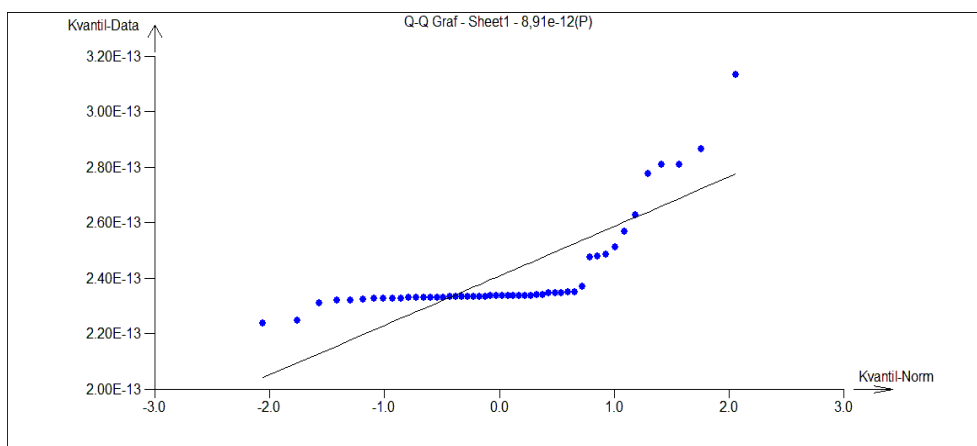
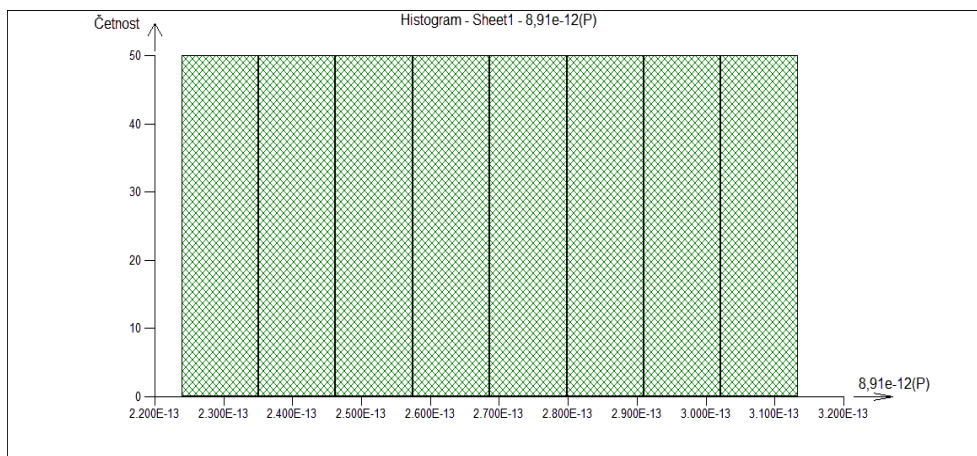
**Elektrická vodivost kompozitu E-sklo/PP při  $\delta$  E-skla**

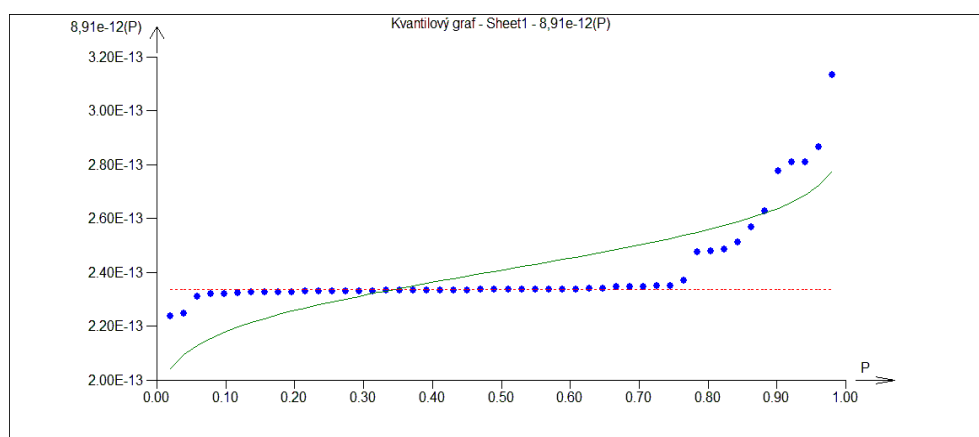
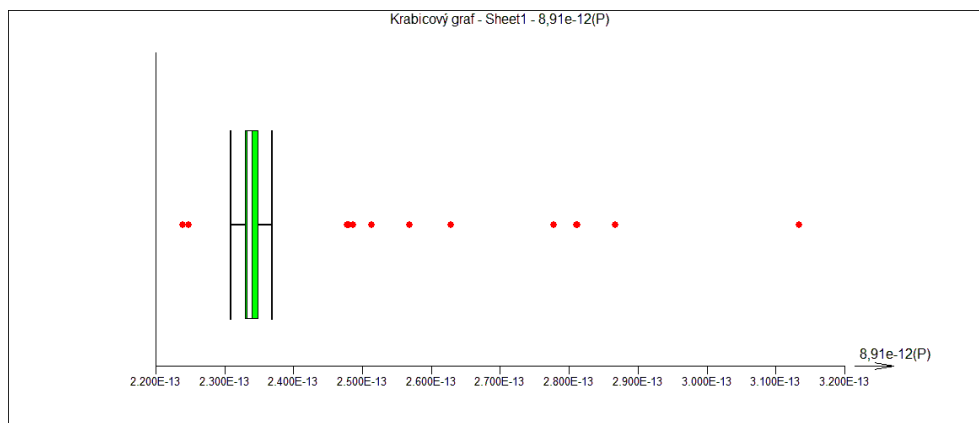
**8,91e-12 [1/ $\Omega$ \*cm]**

\*1 – střední hodnota elektrické vodivosti 10 vazných buněk jednoho modelu kompozitu

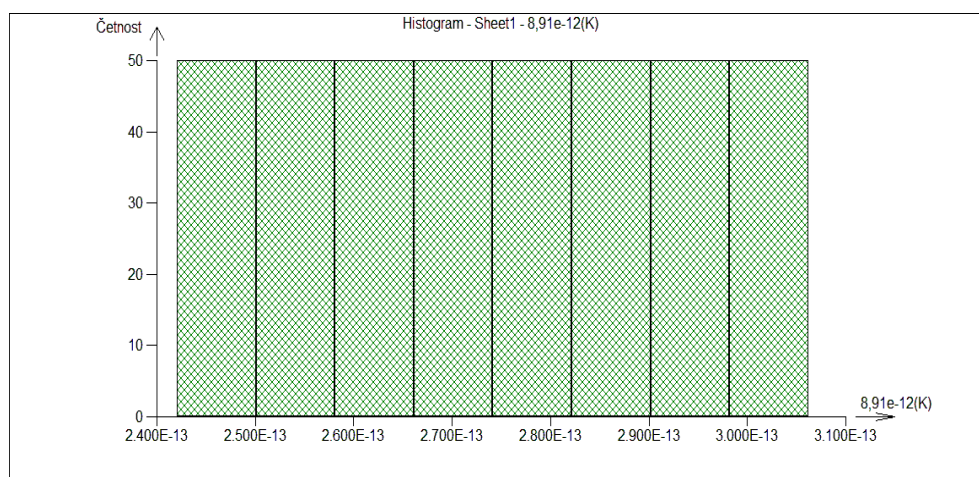
model kompozitu	plátnová výztuž		keprová výztuž	
	kompozitu	vazných buněk	kompozitu	vazných buněk
1	5,076232E-13	8,6064525E-14	5,058196E-13	1,0665370E-13
průměr	2,968439E-13		3,062367E-13	
2	5,076233E-13	2,655211E-14	5,058196E-13	8,117101E-14
průměr	2,670877E-13		2,934953E-13	
3	5,076233E-13	1,9860551E-13	5,058196E-13	6,769898E-14
průměr	3,531144E-13		2,867593E-13	
4	5,076233E-13	1,924581E-13	5,058196E-13	7,448833E-14
průměr	3,500407E-13		2,901540E-13	
5	5,076233E-13	2,092974E-13	5,058196E-13	8,173231E-14
průměr	3,584604E-13		2,937760E-13	
6	5,058196E-13	1,568176E-13	5,058196E-13	8,698923E-14
průměr	3,313186E-13		2,964044E-13	
7	5,058196E-13	1,149404E-13	5,058196E-13	7,220747E-14
průměr	3,103800E-13		2,890135E-13	
8	5,058196E-13	9,569459E-14	5,058196E-13	7,613685E-14
průměr	3,007571E-13		2,909782E-13	
9	5,1655084E-13	8,143842E-14	5,058196E-13	7,213620E-14
průměr	2,989946E-13		2,889779E-13	
10	5,058196E-13	8,678445E-14	5,165084E-13	8,820107E-14
průměr	2,963020E-13		3,023547E-13	
11	5,058196E-13	7,823076E-14	5,058196E-13	7,706344E-14
průměr	2,920252E-13		2,914415E-13	
12	5,058196E-13	8,4646E-14	5,058196E-13	8,939496E-14
průměr	2,952328E-13		2,976073E-13	
13	5,058196E-13	9,355597E-14	5,058196E-13	8,089475E-14
průměr	2,996878E-13		2,933572E-13	
14	5,058196E-13	7,929909E-14	5,058196E-13	8,853956E-14
průměr	2,925593E-13		2,971796E-13	
15	5,058196E-13	8,945738E-14	5,058196E-13	8,174125E-14
průměr	2,976385E-13		2,937804E-13	
16	5,058196E-13	9,177399E-14	5,058196E-13	8,193721E-14
průměr	2,987968E-13		2,938784E-13	
17	5,058196E-13	8,6571E-14	5,058196E-13	9,195213E-14
průměr	2,961951E-13		2,988859E-13	
18	5,058196E-13	7,68051E-14	5,058196E-13	8,258768E-14
průměr	2,913124E-13		2,942036E-13	
19	5,058196E-13	8,125125E-14	5,058196E-13	7,079972E-14
průměr	2,935354E-13		2,883097E-13	
20	5,051820E-13	1,008623E-13	4,558196E-13	8,541217E-14
průměr	3,03022130E-13		2,706159E-13	
21	5,058196E-13	9,373422E-14	5,058196E-13	8,083239E-14
průměr	2,997769E-13		2,933260E-13	
22	5,058196E-13	1,124453E-13	5,058196E-13	8,427169E-14
průměr	3,091325E-13		2,950456E-13	
23	5,058196E-13	1,000426E-13	5,058196E-13	7,292030E-14
průměr	3,029311E-13		2,893700E-13	
24	5,058196E-13	2,743734E-13	5,058196E-13	7,434590E-14
průměr	3,900965E-13		2,900828E-13	
25	5,058196E-13	1,177469E-13	5,058196E-13	8,520724E-14
průměr	3,117833E-13		2,955134E-13	

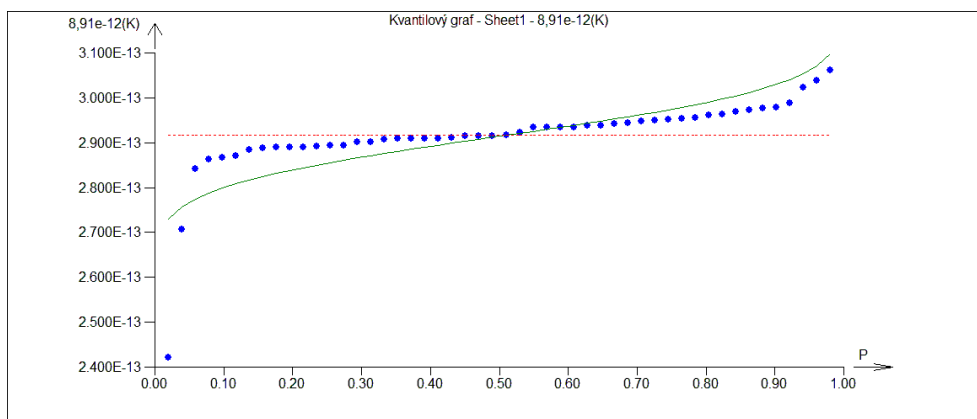
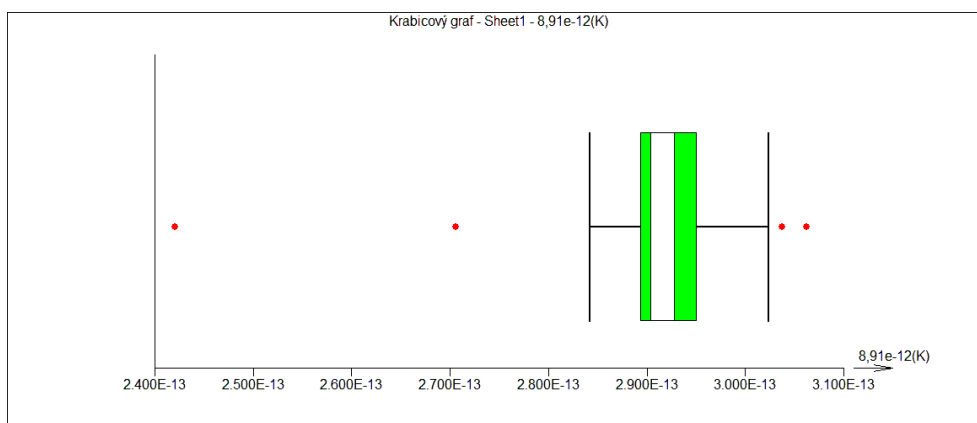
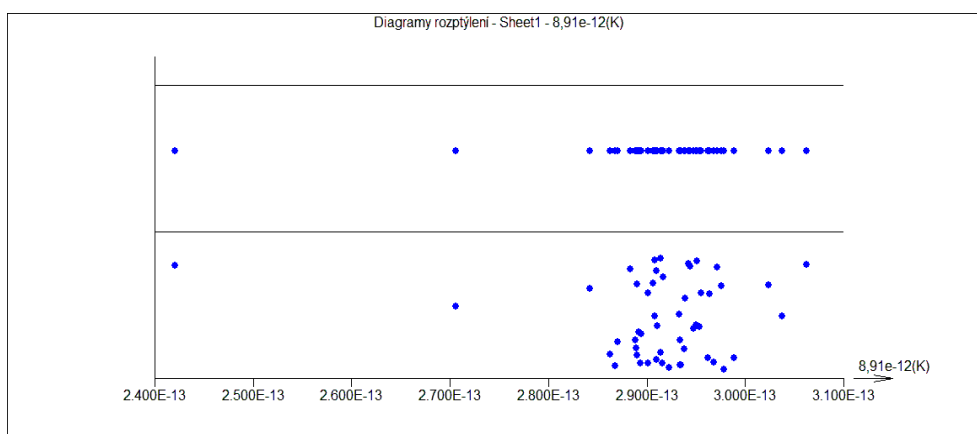
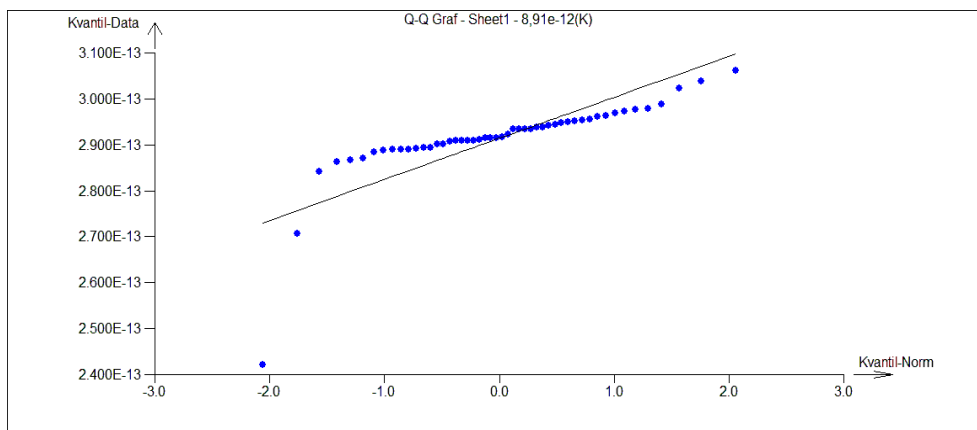
model kompozitu	plátňová výztuž		keprová výztuž	
	kompozitu	vazných buněk	kompozitu	vazných buněk
26	5,052940E-13	1,150294E-13	5,058196E-13	7,732185E-14
průměr	3,101617E-13		2,915707E-13	
27	5,038554E-13	1,093625E-13	5,058196E-13	7,610122E-14
průměr	3,066090E-13		2,909604E-13	
28	5,058196E-13	1,164193E-13	5,058196E-13	8,780894E-14
průměr	3,111195E-13		2,968143E-13	
29	5,058196E-13	9,462522E-14	5,058196E-13	7,581604E-14
průměr	3,002224E-13		2,908178E-13	
30	5,058196E-13	1,022344E-13	5,058196E-13	8,090372E-14
průměr	3,040270E-13		2,933617E-13	
31	5,058196E-13	8,616051E-14	5,058196E-13	7,190457E-14
průměr	2,959901E-13		2,888621E-13	
32	5,058196E-13	9,467866E-14	5,058196E-13	8,657945E-14
průměr	3,002491E-13		2,961995E-13	
33	5,058196E-13	1,144054E-13	5,058196E-13	8,443210E-14
průměr	3,101125E-13		2,951259E-13	
34	5,058196E-13	7,044332E-14	5,058196E-13	8,368362E-14
průměr	2,881315E-13		2,947516E-13	
35	5,058196E-13	6,744957E-13	5,058196E-13	7,206497E-14
průměr	5,901577E-13		2,889423E-13	
36	5,058196E-13	9,151567E-14	5,165085E-13	7,919296E-14
průměr	2,986676E-13		2,978507E-13	
37	5,058196E-13	8,55548E-14	5,058196E-13	8,303326E-14
průměr	2,956872E-13		2,944264E-13	
38	5,058196E-13	7,804361E-14	4,058196E-13	7,827527E-14
průměr	2,919316E-13		2,420474E-13	
39	5,165084E-13	8,382624E-14	5,058196E-13	7,623486E-14
průměr	3,001673E-13		2,910272E-13	
40	5,131380E-13	7,715259E-14	5,058196E-13	7,586954E-14
průměr	2,951453E-13		2,908446E-13	
41	5,058196E-13	7,5905E-14	5,058196E-13	7,7554E-14
průměr	2,908624E-13		2,916866E-13	
42	5,058196E-13	8,8103E-14	5,058196E-13	7,871182E-14
průměr	2,969614E-13		2,922657E-13	
43	5,058196E-13	6,728918E-14	5,058196E-13	8,479740E-14
průměr	2,865544E-13		2,953085E-13	
44	5,058196E-13	7,2546E-14	5,058196E-13	7,256391E-14
průměr	2,891829E-13		2,891918E-13	
45	5,058196E-13	6,0126E-14	5,058196E-13	6,264705E-14
průměr	2,829726E-13		2,842333E-13	
46	5,058196E-13	7,3508E-14	5,058196E-13	7,307179E-14
průměr	2,896640E-13		2,894457E-13	
47	5,058197E-13	7,4533E-14	5,058196E-13	7,553097E-14
průměr	2,901764E-13		2,906753E-13	
48	5,058196E-13	8,4111E-14	5,058196E-13	7,702788E-14
průměr	2,949655E-13		2,914237E-13	
49	5,216215E-13	1,0482E-13	5,058196E-13	6,8251E-14
průměr	3,132200E-13		2,870355E-13	
50	5,038196E-13	9,5347E-14	5,058196E-13	6,679911E-14
	2,995833E-13		2,863094E-13	





## K- keprová vazba výztuže





## **PŘÍLOHÁ č. 3**



**Naměřené hodnoty elektrického odporu kompozitu E-sklo/PP  
při teplotě 25°C**

Vzorek kompozitu E-sklo/PP	měření	rezistence	plošná rezistivita
		$R [\Omega]$	$\rho_s [\Omega]$
1. strana	1	1,4358E+12	1,1965E+12
	2	7,5931E+12	6,3276E+12
	3	2,8416E+12	2,3680E+12
	4	7,9269E+12	6,6058E+12
	5	9,1558E+12	7,6298E+12
	<b>průměr</b>	<b>5,7906E+12</b>	<b>4,8255E+12</b>
2. strana	1	7,1947E+12	5,9956E+12
	2	9,0217E+12	7,5181E+12
	3	3,2279E+12	2,6899E+12
	4	3,9457E+12	3,2881E+12
	5	7,2502E+12	6,0418E+12
	<b>průměr</b>	<b>6,1280E+12</b>	<b>5,1067E+12</b>

**Naměřené hodnoty elektrické vodivosti kompozitu E-sklo/PP  
při teplotě 25°C**

Vzorek kompozitu E-sklo/PP	měření	vodivost	plošná vodivost
		$1/R [1/\Omega \cdot \text{cm}]$	$1/\rho_s [1/\Omega \cdot \text{cm}]$
1. strana	1	6,964758323E-13	8,357711E-13
	2	1,316985158E-13	1,580378E-13
	3	3,519144144E-13	4,222973E-13
	4	1,261527205E-13	1,513821E-13
	5	1,092203849E-13	1,310652E-13
	<b>průměr</b>	<b>2,8309237E-13</b>	<b>3,397107E-13</b>
2. strana	1	1,3899120E-13	1,6678898E-13
	2	1,1084385E-13	1,3301233E-13
	3	3,0979894E-13	3,7176103E-13
	4	2,5344045E-13	3,0412700E-13
	5	1,3792723E-13	1,6551359E-13
	<b>průměr</b>	<b>1,9020034E-13</b>	<b>2,2824059E-13</b>